

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС В УСЛОВИЯХ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**О.М. Гулина, О.О. Фролова**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Для прогнозирования ресурса оборудования АЭС в условиях ЭКИ использована модель Чексала-Гурвица, реализованная в коде ЭКИ-02, включающая в себя 12 наиболее значимых параметров, в том числе коэффициент Келлера, характеризующий геометрию элемента. Известные значения этого коэффициента получены по данным лабораторных исследований и опыта эксплуатации зарубежных АЭС. В работе для расчета коэффициента Келлера и оценки его статистических характеристик по данным эксплуатации и материалам российских блоков разработана процедура, получены оценки скорости ЭКИ по данным оперативного контроля и на основании прогноза по эмпирической модели выполнена оценка вероятностных характеристик коэффициентов Келлера для различных элементов трубопроводов разных типоразмеров. Для оценки погрешности, связанной с влиянием химсостава на скорость ЭКИ, выполнена сравнительная оценка скорости ЭКИ по уравнению Дюрекса (с данными замеров химсостава) со скоростью ЭКИ, рассчитанной по ЭКИ-02.

**Ключевые слова:** трубопровод, толщина стенки, скорость эрозионно-коррозионного износа, коэффициент келлера, химсостав.

**Key words:** piping, wall thickness, erosion-corrosion wear rate, Keller coefficient, metal content.

Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) является наиболее распространенной причиной опасных повреждений элементов оборудования и трубопроводов АЭС, изготовленных из сталей перлитного класса. Последствия аварий вследствие ЭКИ приводят к существенным экономическим потерям. Поэтому особенно актуальны вопросы прогнозирования развития данного процесса, в том числе оценки скорости ЭКИ и остаточного ресурса для оптимизации объемов и периодичности контроля оборудования, подверженного ЭКИ.

В настоящее время основным источником информации об интенсивности ЭКИ являются данные ультразвуковой толщинометрии. Однако анализ данных контроля затруднен из-за объективных трудностей, связанных с представлением данных замеров и их точностью, что требует разработки технологии проведения контроля и методик обработки статистических данных. Эти вопросы рассмотрены, в час-

тности, в работах [1–3]. Однако вопросы оптимизации контроля и ранжирования оборудования с точки зрения подверженности ЭКИ невозможно решить без прогнозирования этого процесса.

Задача прогнозирования связана, в первую очередь, с наличием адекватной модели, отражающей основные параметры оборудования и условий эксплуатации. Интенсивность ЭКИ по данным как зарубежных, так и российских исследований зависит от большого числа факторов [1, 4, 5]. Среди существующих в настоящее время программных средств (ПС) расчета скорости ЭКИ [4–7] наибольшее распространение получили ПС, в основе которых лежит модель Чексала-Гурвица, в которой используются 12 наиболее значимых параметров:

- температура среды;
- содержание кислорода, pH жидкой пленки, тип применяемого амина;
- химического состава стали (весовое содержание элементов Cr, Mo, Cu);
- геометрии трубопровода;
- времени эксплуатации трубопровода;
- скорости потока и др.

$$W = \frac{F_1(T) \cdot F_9(G) \cdot F_{10}(Am) \cdot F_{11}(\tau)}{F_2(V) \cdot F_3(O_2) \cdot F_4(pH) \cdot F_5(Cr) \cdot F_6(Mo) \cdot F_7(Cu) \cdot F_8(D)} \quad (1)$$

Зависимость от геометрии и неопределенность, связанная с неполнотой модели, заключены в таком показателе, как коэффициент Келлера  $F_9(G)$ . Существенное влияние на скорость ЭКИ оказывает также химический состав металла оборудования (весовое содержание в металле хрома  $F_5(Cr)$ , меди  $F_7(Cu)$  и молибдена  $F_6(Mo)$ ). Целью данной работы является оценка коэффициентов Келлера для различных элементов трубопроводов, изготовленных из сталей перлитного класса, с помощью программного средства ЭКИ-02 и данных эксплуатационного контроля.

### РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ КЕЛЛЕРА И ОЦЕНКА ИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для адаптации эмпирической модели к реальному оборудованию и реальным условиям эксплуатации вводится коэффициент, учитывающий геометрию элемента трубопровода, так называемый коэффициент Келлера. Программные продукты, реализующие данную модель за рубежом (*CHEKWORKS*, *WATHEC*, *DASY*, *COMSY* и др.) и основанные на лабораторных исследованиях и опыте эксплуатации зарубежных АЭС, оценивают коэффициент Келлера как константу. Для адаптации данной модели к российским блокам требуется учет их специфики, в том числе состава металла, компоновки контура, водно-химического режима и т.д. Кроме того, условия эксплуатации на российских блоках сильно отличаются, что также не позволяет ожидать одинаковых результатов. Большую неопределённость при этом вносит практика контроля оборудования на российских АЭС (нет входного контроля состава металла, наличие допусков при изготовлении, использование других типоразмеров, неполная схема замеров и т.д.).

Гидродинамические коэффициенты (коэффициенты Келлера) используются в зарубежных ПС [4, 5], а также в отечественных ПС ЭКИ-02 и ЭКИ-03 [6, 7]. Однако для одних и тех же элементов значения гидродинамических коэффициентов отличаются в три-шесть раз и более [8], что определяется условиями проведения эксперимента (табл. 1).

В каждом конкретном случае эти коэффициенты должны определяться экспериментально.

Значения коэффициентов Келлера для различных геометрических конфигураций на зарубежных АЭС (для модели Чексала-Гурвица) приведены на рис. 1.

Таблица 1

**Значения гидродинамических коэффициентов для различных элементов трубопроводных систем**

Элемент	Гидродинамические коэффициенты в различных ПС				
	<i>Keller</i>	<i>Chehal</i>	<i>Remy</i>	<i>Woolsey</i>	<i>Kastner</i>
Прямая труба <sup>1</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Гиб 90°	5,75–13,0	3,7	2,1	1,7	6,0–11,0
Дроссель расшир. сужающ.	–	2,5	3,2	–	–
Вход в трубу	4,0	–	–	2,5 <sup>2</sup>	3,61–6,24
Расширит. расшир. сужающ.	–	3,0	3,6	–	–
Расширение трубы	–	–	–	2,0 <sup>2</sup>	–
Дросселирующее устройство	4,0–6,0	5,0	2,9	3,0–4,0 <sup>2</sup>	–
Тройн. прям. часть собир. ответвл.	3,75	5,0	5,7	2,0–2,5 <sup>2</sup>	–
Тройн. прям. часть разд. ответв.	18,75	5,0	5,7	–	–

Примечания

- <sup>1</sup> – геометрические коэффициенты, определяемые по отношению к прямой трубе
- <sup>2</sup> – референтные значения, определяемые к элементам, расположенным дальше по потоку

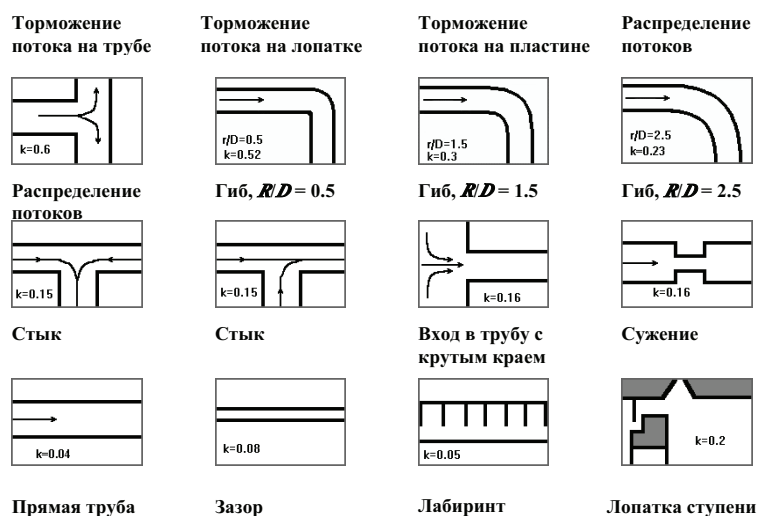


Рис. 1. Значения коэффициентов Келлера для различных геометрических конфигураций на зарубежных АЭС (для модели Чексала-Гурвица)

Для расчета коэффициента Келлера и оценки его статистических характеристик по данным эксплуатации и материалам российских блоков решены следующие задачи:

- разработка процедуры оценки коэффициентов Келлера;
- систематизация, обработка и анализ данных эксплуатационного контроля толщин элементов трубопроводов;
- оценка скорости ЭКИ ( $W_{эки}$ ) по данным оперативного контроля;
- прогнозная оценка  $W_{эки}$ ;
- оценка вероятностных характеристик коэффициентов Келлера для различных элементов трубопроводов разных типоразмеров.

Разработанная методика оценки коэффициента Келлера состоит из пяти этапов:  
 1) классификация данных эксплуатационного контроля;  
 2) вычисление скорости ЭКИ с помощью разработанного программного модуля;  
 3) расчет коэффициента Келлера  $K$  как отношения скорости ЭКИ, определенной по данным контроля, к средней скорости, рассчитанной по эмпирической модели при  $K=1$ ;

4) на основании полученных коэффициентов Келлера вычисление математического ожидания, дисперсии и доверительного интервала для всех типоразмеров различных элементов трубопроводов АЭС;

5) сравнительная оценка полученных результатов со значениями коэффициента Келлера на зарубежных АЭС (для модели Чексала-Гурвица).

Чтобы обеспечить однородность выборок, для решения поставленной задачи на одном из энергоблоков для разных подсистем (питательной воды, паропроводов, трубопроводов основного конденсата) выделены следующие элементы: прямые участки, гибы, околошовные зоны (ОШЗ), переходы. Кроме того, составлены отдельные выборки для элементов реакторного и турбинного цехов. Поскольку не все значения параметров, необходимые для использования ПС ЭКИ-02, приведены в протоколах замеров толщины стенки рассматриваемых элементов, то в расчетах использованы значения, взятые из условий работы соответствующей подсистемы, а неизвестные значения химсостава приняты равными нижней границе возможных значений, что соответствует максимальной скорости ЭКИ. Авторы отдают себе отчет в том, что значения коэффициентов Келлера при этом могут быть занижены до 10 раз. Тем не менее, задача оценки ширины разброса значений коэффициента Келлера будет выполнена.

В соответствии с разработанной процедурой получены результаты, приведенные на рис. 2 и 3 и в табл. 2 для разных типоразмеров (в скобках – объем выборки).

Схема замеров на российских блоках отличается от принятой на зарубежных. Если на зарубежных АЭС за время ППР производится более 150000 замеров, то на российских только 15000 замеров, поэтому существует большая вероятность пропустить замеры как с существенным утонением, так и с утолщениями, обусловленными отложениями продуктов коррозии. Эта особенность проведения контроля скажется на точности оценки скорости ЭКИ по данным контроля и, соответственно, на точности оценки коэффициента Келлера.

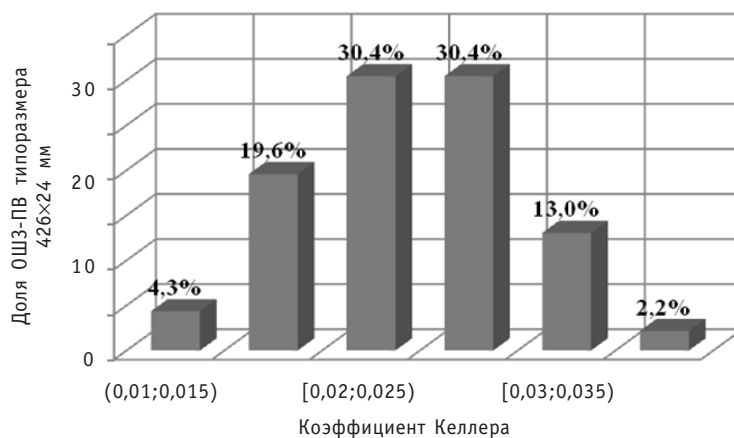


Рис. 2. Распределение значений коэффициента Келлера для ОШЗ трубопровода ПВ типоразмера 426x24 мм одного из энергоблоков

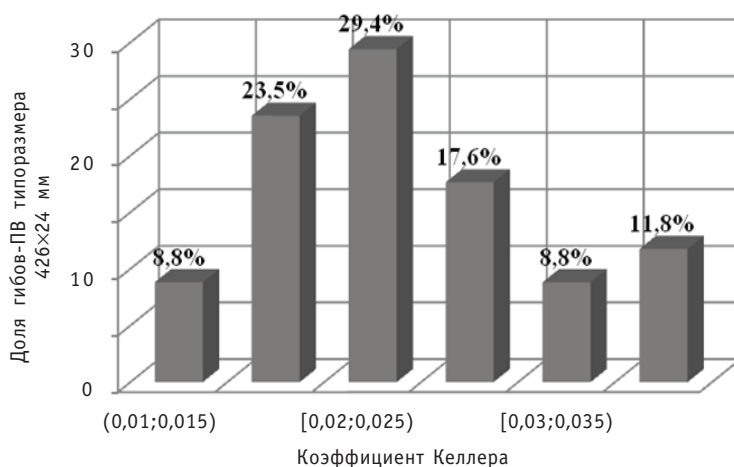


Рис. 3. Распределение значений коэффициента Келлера для гибов трубопроводов ПВ типоразмера 426x24 мм одного из энергоблоков

Таблица 2

**95%-ные доверительные интервалы коэффициентов Келлера для элементов разных типоразмеров**

	Типоразмер, мм	Мат. ожидание	Погрешность, ε	Доверительный интервал, мм
<b>Реакторный цех</b>				
ОШЗ ПВ	273x16	0,02	0,002	(0,0185;0,0214)
	426x24	0,024	0,007	(0,0174;0,0314)
Гибы ПВ	426x24	0,024	0,011	(0,0126;0,0354)
ОШЗ ПП	273x16	0,17	0,034	(0,138;0,206)
	325x19	0,18	0,047	(0,130;0,223)
	426x24	0,14	0,013	(0,130;0,155)
Гибы ПП	273x16	0,13	0,014	(0,1145;0,1425)
	325x19	0,17	0,06	(0,112;0,227)
Переходы ПП	159x9 273x16	0,19	0,031	(0,159;0,221)
<b>Турбинный цех</b>				
ОШЗ ПВ	426x24	0,02	0,009	(0,0141;0,0319)
Прямые участки ПП	426x24	0,01	0,001	(0,0124;0,0139)
Гибы ПП	426x24	0,18	0,044	(0,136;0,224)
ОШЗ ОК	325x13	0,053	0,02	(0,0306;0,0747)
	426x24	0,038	0,03	(0,0111;0,0638)
	630x17	0,013	0,002	(0,011;0,0154)
Гибы ОК	426x24	0,031	0,02	(0,013;0,05)
	630x17	0,013	0,002	(0,011;0,0143)

При сравнении полученных коэффициентов Келлера с приведенными на рис. 1 видно, что рассчитанные коэффициенты отличаются от зарубежных. Основ-

ным фактором, определяющим разброс в значениях скоростей ЭКИ трубопроводов АЭС, является неизвестный химический состав металла. На разных блоках отличие может быть обусловлено также и другими причинами. Поэтому использовать для прогноза эмпирическую модель следует с коэффициентами Келлера, полученными на данном блоке.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛА НА СКОРОСТЬ ЭКИ

Химический состав является одним из основных факторов, определяющих склонность металла к ЭКИ. Концентрация элементов Cr, Mo, Cu в металле может изменяться от нуля до 0,3%. При изменении концентрации хрома и меди в этих пределах скорость ЭКИ может измениться примерно на порядок, причем минимальная скорость ЭКИ будет при концентрации 0,3%.

Для оценки погрешности учета влияния химического состава металла на скорость ЭКИ необходимо решить следующие задачи:

- подготовка исходных данных;
- прогнозирование ресурса элементов трубопроводов;
- исследование эмпирической модели на эксплуатационных данных.

На рисунках 4 и 5 представлены гистограммы замеров химсостава и диапазоны изменения содержания хрома и меди.

В сталях 20, 15 ГС и 16 ГС в качестве примесных элементов присутствует хром и медь. Концентрация хрома и меди в указанных сталях находится в диапазоне от 0,05 до 0,28%. При увеличении концентрации хрома и меди от 0,03 до 0,15% скорость ЭКИ уменьшается соответственно в 3,4 и в 1,5 раза.

Для оценки погрешности, связанной с влиянием химсостава на скорость ЭКИ, сравним результаты оценки скорости ЭКИ по уравнению Дюрекса (с данными замеров химсостава) – выборка  $X$  – и скоростью ЭКИ, рассчитанной по ЭКИ-02. Уравнение Дюрекса, используемое для учета влияния химического состава металла на скорость ЭКИ, записывается в виде

$$W_{\text{ЭКИ}} = W_{\text{ЭКИ}}^{\text{max}} \frac{1}{83 \times \text{Cr}^{0.89} \times \text{Cu}^{0.25} \times \text{Mo}^{0.2}} \quad (2)$$

где  $W_{\text{ЭКИ}}$ ,  $W_{\text{ЭКИ}}^{\text{max}}$  – соответственно значения скорости ЭКИ при наличии и отсутствии

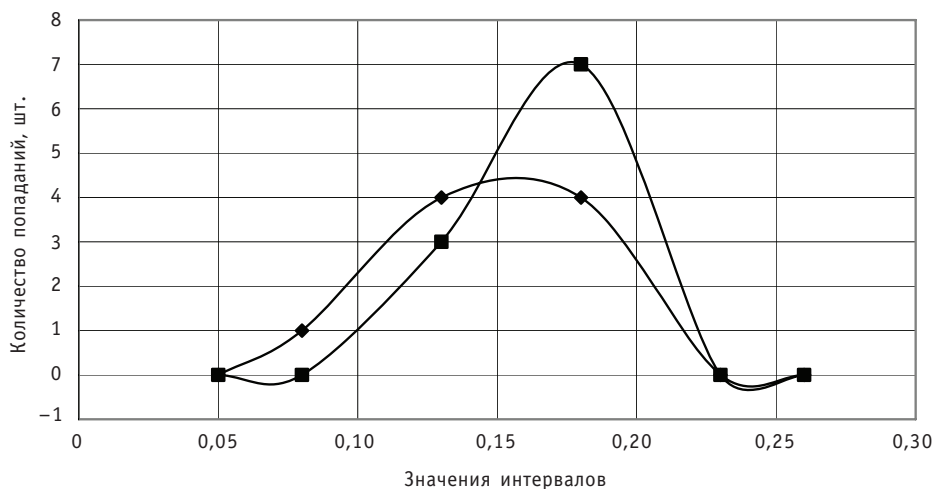


Рис. 4. Распределение значений концентрации хрома и меди по интервалам в металле главного паропровода 465×16 мм:  $\blacklozenge$  – Cr;  $\blacksquare$  – Cu

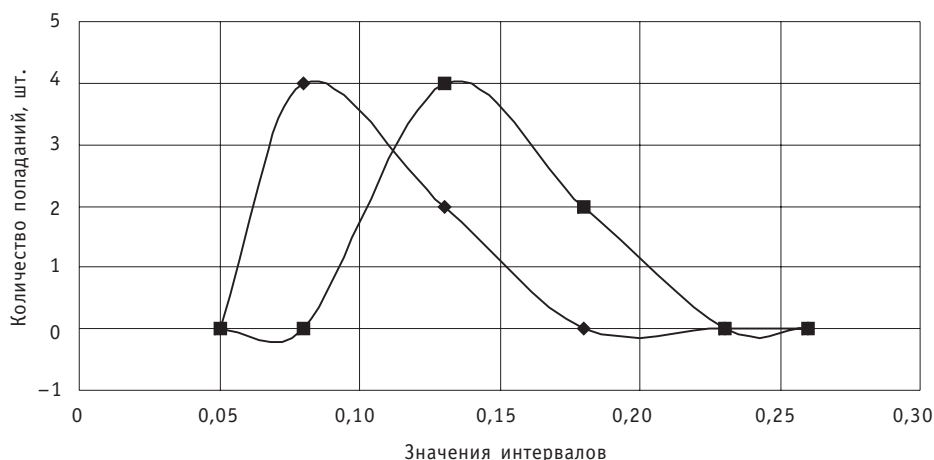


Рис. 5. Распределение по интервалам концентраций хрома и меди в металле сварных швов:  
 ◆ – Cr; ■ – Cu

примесных элементов, мм/г.; Cr, Cu, Mo – соответственно весовая концентрация в металле хрома, меди и молибдена, %.

Для численной оценки степени совпадения используются коэффициент корреляции и параметр степени отклонения результатов расчетов ( $X$  и  $Y$ ) по ПС ЭКИ-02 и по уравнению Дюркса.

Коэффициент корреляции  $\rho$  для  $n$  пар значений  $X$  и  $Y$  рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left( X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right) \cdot \left( Y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \right) \right\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( Y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}} . \quad (3)$$

В качестве меры отклонения значений  $X$  от  $Y$  используется величина среднего квадратичного отклонения  $\lambda$ , рассчитываемая по формуле

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} . \quad (4)$$

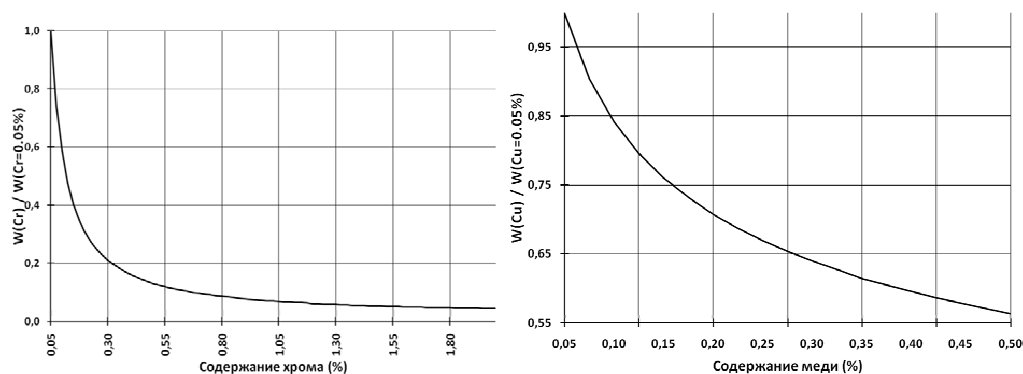


Рис. 6. Зависимости скорости ЭКИ от содержания хрома (а) и меди (б) в металле

**Вероятностные характеристики**

	Коэффициент корреляции $\rho$		Среднее квадратичное отклонение $\lambda$		Максимальная погрешность, %	
	Cr	Cu	Cr	Cu	Cr	Cu
Химический анализ металла сварных швов после 100 тыс. часов эксплуатации, вставка 100 мм	0,997	0,999	0,0167	0,0007	1,85	0,51
Химический анализ металла сварных швов после 100 тыс. часов эксплуатации	0,997	0,998	0,0160	0,0065	1,85	0,94
Общий анализ	0,997	0,997	0,0171	0,0148	1,86	1,76

Для численной оценки степени совпадения используются коэффициент корреляции и параметр степени отклонения результатов расчетов ( $X$  и  $Y$ ):

$$\frac{|W_{\text{ЭКИ-02}} - W_{\text{Дюр}}|}{W_{\text{Дюр}}} \quad (5)$$

Абсолютная погрешность расчетов эмпирического уравнения Дюркса составляет 2,1%. При верификации расчет скорости ЭКИ по ПС ЭКИ-02 сопоставляется с результатами расчетов по уравнению Дюркса и определяется погрешность расчетов с учетом погрешности уравнения Дюркса (табл. 3).

Получено, что результаты, рассчитанные по модели ЭКИ-02, соответствуют полученным по уравнению Дюркса с погрешностью, не превышающей 2% во всей области изменения концентраций хрома и меди.

**ВЫВОДЫ**

1. Систематизированы данные толщинометрии стенок элементов трубопроводов ряда АЭС, определена степень износа, рассчитаны скорости ЭКИ металла отдельных элементов трубопроводов.
2. Разработана методика расчета коэффициента Келлера и оценки его вероятностных характеристик, рассчитаны коэффициенты Келлера для отдельных элементов. Оценки представлены в виде гистограмм и средних оценок с 95%-ными доверительными интервалами.
3. Систематизированы данные химического состава и толщинометрии элементов трубопроводов.
4. Рассчитаны скорости ЭКИ металла отдельных элементов трубопроводов, разработана процедура оценки влияния химического состава на скорость износа элементов трубопровода.

**Литература**

1. Бараненко В.И., Янченко Ю.А., Гулина О.М., Докукин Д.А. О расчете скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса трубопроводов АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 3.
2. Бараненко В.И., Гулина О.М., Ампилогов М.О. О прогнозировании длительности эксплуатации элементов трубопроводных систем АЭС, подверженных эрозионно-коррозионному износу // Сборник ВНИИАЭС «Основные работы, выполненные в ВНИИАЭС в 2010 г.». – М.: ВНИИАЭС. – С. 81-94.
3. Бараненко В.И., Янченко Ю.А., Гулина О.М. и др. Эксплуатационный контроль трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу // Теплоэнергетика. 2009. – №5. – С. 20-27.



4. Бараненко В.И., Олейник С.Г., Янченко Ю.А. и др. Использование программных средств для расчета эрозионно-коррозионного износа элементов трубопроводных систем АЭС//Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 21-24.

5. Chexal V.K. (Bind), Horowitz J.S. Chexal-Horowitz Flow-Accelerated Corrosion Model-Parameter and Influences. Current perspective of Inter. Pressure Vessels and Piping: Codes and Standard. Book No. 409768. – 1995. – P. 231-243.

6. Регистрационный паспорт аттестации ПС ЭКИ-02 № 165 от 19.09.2003 г.

7. Регистрационный паспорт аттестации ПС ЭКИ-03 № 202 от 23.06.2005 г.

8. Zheng Y. A steady state FAC model in carbon steel and its application on practical geometries by means of CFD/FAC2010 International conference on Flow Accelerated Corrosion (May 4-7 2010, Lion, France). – 18 p.

Поступила в редакцию 9.12.2011

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 energetica» (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 energetica» (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 energetica» (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 energetica» (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.