

## ПОВТОРНЫЕ ЗАМЕРЫ И КАЧЕСТВО ОЦЕНОК ПРИ АНАЛИЗЕ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

**В.И. Бараненко\*, О.М. Гулина\*\*, С.А. Миронов\*\*\*, Н.Л. Сальников\*\*\***

\* АО «ВНИИАЭС»

109507, г. Москва, ул. Ферганская, 25

\*\* ФГУП ОКБ «Гидропресс»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

\*\*\* ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249020, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1



Выполнено исследование элементов трубопроводов из углеродистой стали, подверженных эрозионно-коррозионному износу (ЭКИ). Представлены результаты расчета характеристик ЭКИ – утонения и скорости ЭКИ – на основании данных повторного контроля. Показано, что такие оценки содержат большую неопределенность из-за отложений продуктов коррозии на внутренней поверхности трубопровода и их миграции в течение эксплуатации. С увеличением времени эксплуатации, в том числе при продлении ресурса, разница между прогнозом и результатами контроля увеличивается, а значит, увеличивается и погрешность оценок остаточного ресурса. Исследование основано на данных замеров толщин стенок трубопровода питательной воды типоразмера 273×16 мм и паропровода типоразмера 465×16 мм АЭС с ВВЭР-440, для которых выполнено достаточное количество повторных замеров на большом временном интервале. Анализируется погрешность оценок утонения стенок трубопроводов и скорости ЭКИ с использованием прогнозной модели Чексала-Гурвица (программные средства ЭКИ-02 и ЭКИ-03). Оценка скорости ЭКИ по прогнозной модели отличается от оценки по текущим данным контроля не более, чем на 12,5%, поскольку на большей временной базе нивелируются значения отложений продуктов коррозии на внутренней стенке трубопровода. При расчете утонений очевидная фильтрация данных контроля позволяет без модернизации модели достичь приемлемой точности оценок – порядка 16%.

**Ключевые слова:** эрозионно-коррозионный износ, прогнозирование ресурса, оценка скорости коррозии, коэффициент Келлера, фильтрация данных, повторные замеры, модель Чексала-Гурвица.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ результатов контроля состояния металла показывает существенную неравномерность эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) оборудования и трубопроводов, который зависит от большого числа факторов. Знание механизма ЭКИ, его зависимости от свойств металла, геометрических характеристик, эксплуатационных режимов позво-

© В.И. Бараненко, О.М. Гулина, С.А. Миронов, Н.Л. Сальников, 2020

ляет на стадии проектирования технологических систем второго контура АЭС принимать наиболее эффективные проектно-конструкторские решения, на стадии эксплуатации – оптимизировать объемы эксплуатационного контроля, снижать количество инцидентов по причине ЭКИ и внеплановых остановов энергоблоков, а также расходы на контроль.

Степень износа элемента оборудования или трубопровода, рассчитанная по результатам однократного контроля толщин стенок, содержит много неопределенностей [1], снижающих точность оценок [2 – 6]. К этим факторам можно отнести следующие:

- отсутствие данных входного контроля толщин стенок, в то время как технологический допуск на толщину стенки при изготовлении трубопроводов из углеродистой стали варьируется в диапазоне от –5 до +20% [7, 8];
- фиксирование совместной толщины неповрежденного металла и плотных влажных отложений продуктов коррозии при проведении эксплуатационного контроля [9], хотя наличие отложений не увеличивает несущей способности элемента;
- выбор сетки замеров толщин стенок в окружном и осевом направлениях, влияние геометрии элементов трубопроводов, трассировки трубопроводных систем и др. [10].

Наличие указанных факторов способствует тому, что оценить погрешность расчетов скорости ЭКИ на основании данных эксплуатационного контроля весьма затруднительно.

Существует большое разнообразие методик оценки характеристик ЭКИ, принимающих во внимание вышеперечисленные факторы [1, 11], в том числе по данным повторного контроля [8].

Наиболее простая модель оценки скорости ЭКИ  $W_{ЭКИ}$  [12, 13]

$$W_{ЭКИ} = (S_{ном} - S_{мин})/\Delta\tau, \quad (1)$$

где  $S_{ном}$  – номинальная толщина, мм;  $S_{мин}$  – минимальная толщина по данным контроля, мм;  $\Delta\tau$  – интервал времени от даты ввода элемента в эксплуатацию до даты проведения контроля, лет;  $(S_{ном} - S_{мин})$  – утонение.

По скорости ЭКИ определяется остаточный ресурс  $\tau$  (или длительность эксплуатации трубопровода до достижения допустимой толщины стенки), лет,

$$\tau = (S_{мин} - S_{доп})/W_{ЭКИ}, \quad (2)$$

где  $S_{доп}$  – значение минимально допустимой толщины (определяется по [14]), мм.

Для уточнения оценок характеристик ЭКИ используются различные методы обработки повторных замеров [8]: метод полосы (Band Method), метод площадей (Area Method), метод перемещения защитного слоя (Moving Blanket Method), метод «от точки к точке» (Point-to-Point Method). Все методы основаны на том, что размыв, вызванный ЭКИ, находится в локальной области. Однако ультразвуковой контроль измеряет совместную толщину неповрежденного металла и отложений продуктов коррозии, причем в одних и тех же точках при повторном контроле толщина может то увеличиваться, то уменьшаться. Все это затрудняет использование вышеперечисленных методов, так как расчет выдает противоречивые результаты.

Одним из способов адекватного оценивания состояния элемента трубопровода, а также решения проблемы оптимизации объемов и периодичности контроля является использование прогнозных моделей. Одной из наиболее распространенных, заложенных в различные программные средства (ПС), является модель Чексала-Гурвица (Chexal-Nowowitz) [10, 15]. Эта же модель лежит и в основе российских ПС ЭКИ-02 (для однофазной среды) и ЭКИ-03 (для двухфазной) [13].

Интенсивность ЭКИ в данной модели определяется эмпирической зависимостью

$$W_{ЭКИ} = C_0 \cdot F_1(T) \cdot F_2(XC) \cdot F_3(W) \cdot F_4(O_2) \cdot F_5(pH) \cdot F_6(Ke) \cdot F_7(\alpha) \cdot F_8(A), \quad (3)$$

где  $W_{ЭКИ}$  – скорость ЭКИ, мм/год;  $C_0$  – коэффициент, равный 1 мм/год;  $F_1(T)$  – коэффициент, учитывающий температуру;  $F_2(XC)$  – коэффициент, учитывающий состав металла

(содержание хрома, меди и молибдена);  $F_3(W)$  – коэффициент, определяемый скоростью среды;  $F_4(O_2)$  – коэффициент, учитывающий концентрацию кислорода;  $F_5(pH)$  – коэффициент, зависящий от pH;  $F_6(Ke)$  – коэффициент, учитывающий геометрию трубопровода (типоразмер и коэффициент Келлера);  $F_7(\alpha)$  – коэффициент, учитывающий влажность пара (для однофазной среды  $F_7(\alpha) = 1$ );  $F_8(A)$  – коэффициент, учитывающий используемый амин (аммиак, морфолин, этаноламин).

Тем самым в модели Чексала-Гурвица учитываются основные параметры, влияющие на скорость ЭКИ. Использование программных средств дает возможность проводить прогнозные расчеты и ранжировать трубопроводы по степени подверженности ЭКИ.

Однако было замечено, что при больших сроках эксплуатации, в том числе при продлении ресурса, разница между прогнозом и результатами контроля увеличивается, а значит, увеличивается и погрешность оценок остаточного ресурса. Такая ситуация требует дополнительного исследования и возможной модернизации прогнозной модели в случае необходимости.

Работа посвящена анализу данных контроля толщин стенок, их интерпретации и оценке расхождения с результатами прогноза в зависимости от длительности эксплуатации.

Цель исследования – снизить консерватизм прогноза ЭКИ на основании оценок информативности повторных замеров. В рамках данного исследования выполнены расчеты для элементов трубопроводов питательной воды и паропроводов АЭС с РБМК-1000 и АЭС с ВВЭР-440.

### ВЛИЯНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ИНТЕРПРЕТАЦИЮ ДАННЫХ КОНТРОЛЯ

При анализе данных повторного контроля удается выявить влияние отложений продуктов коррозии (ПК) на внутренней поверхности трубопровода на результаты оценивания характеристик ЭКИ. Отложения ПК приводят к тому, что при повторном контроле утонение стенки в определенной точке может то увеличиваться, то уменьшаться, что противоречит физическому смыслу износа. Однако данные контроля выглядят именно так. На рисунках 1, 2 приведены значения минимальных и максимальных толщин стенокгиба трубопровода питательной воды АЭС с ВВЭР-440 типоразмера 273×16 мм в 1996 и 2002 гг. [9].

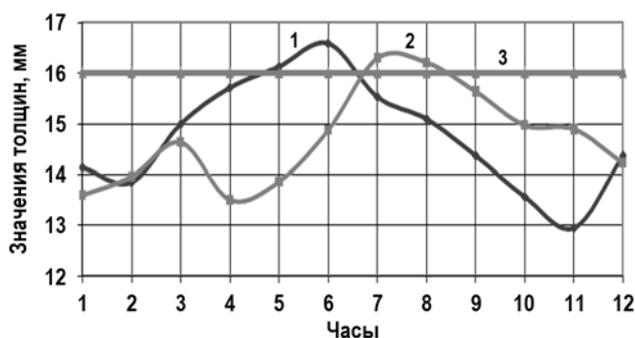


Рис. 1. Значения минимальных толщин стенокгиба [9]: 1 – в 1996 г.; 2 – в 2002 г.; 3 – номинальная толщина

Видно, что при практически той же средней толщине произошла существенная миграция отложений продуктов коррозии. Оценивание скорости ЭКИ по обычной формуле (1) приведет к тому, что с течением времени оценка остаточного ресурса вырастет. Чтобы получить адекватные оценки характеристик ЭКИ, необходимо использовать прогнозные модели либо уточнять оценки с помощью методов обработки повторных замеров [8].

Для расчета с помощью прогнозной модели (3) необходимо знать содержание хрома в металле. Поскольку оно априори неизвестно, то этот показатель взяли в качестве переменной, чтобы адаптировать модель к данным контроля.

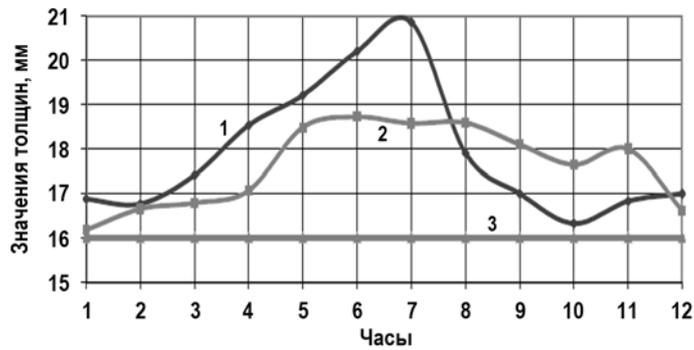


Рис. 2. Значения максимальных толщин стенок гйба [9]: 1 – в 1996 г.; 2 – в 2002 г.; 3 – номинальная толщина

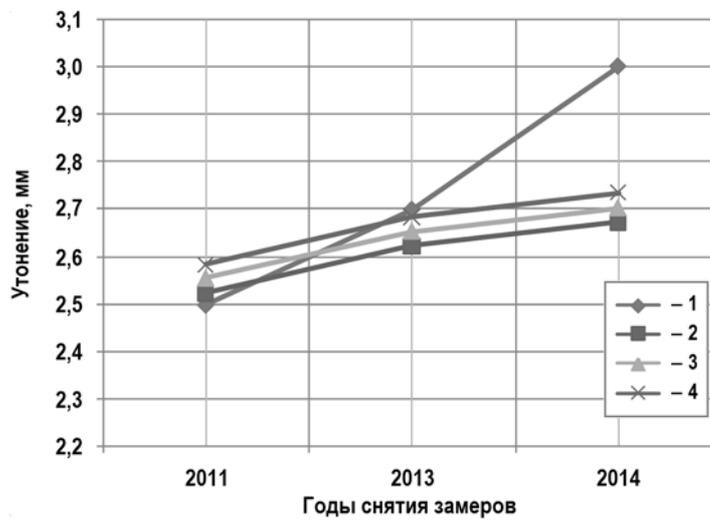


Рис. 3. Прогнозные оценки, полученные по ПС ЭКИ-02 при близких значениях концентрации  $C_r$  в металле: 1 – замеры; 2 –  $C_r = 0,0752$ ; 3 –  $C_r = 0,0741$ ; 4 –  $C_r = 0,073$

Таблица 1

**Результаты расчета по ПС ЭКИ-02 в 2011 г.**

$C_r$ , %	$T_{нач}$ , лет	$T_{кон}$ , лет	$ЭКИ_{нач}$ , мм/г.	$ЭКИ_{кон}$ , мм/г.	$ЭКИ_{ср}$ , мм/г.	Утонение, мм
0,0674	0	30	0,4700	0,0535	0,0916	2,7489
0,0685	0	30	0,4641	0,0528	0,0905	2,7145
0,0696	0	30	0,4583	0,0521	0,0893	2,6809
0,0708	0	30	0,4528	0,0515	0,0883	2,6482
0,0719	0	30	0,4473	0,0509	0,0872	2,6162
0,073	0	30	0,4419	0,0503	0,0861	2,585
0,0741	0	30	0,4367	0,0497	0,0852	2,5545
0,0752	0	30	0,4317	0,0491	0,0842	2,5248
0,0764	0	30	0,4267	0,0485	0,0832	2,4957
0,0775	0	30	0,4218	0,0480	0,0822	2,4673
0,0786	0	30	0,4171	0,0474	0,0813	2,4395

Для обеспечения консервативности и дополнительной надежности при расчете по ПС ЭКИ-02 возьмем три значения утонения, ненамного превышающих фактическое, полученное в 2011 г., а именно, 2,5 мм. Таким образом, близким к контрольным значениям утонениям 2,5248; 2,5545; 2,585 мм соответствуют значения хрома 0,0752; 0,0741; 0,073% (табл. 1). Здесь исходными данными для расчета являются температура  $T = 170^\circ\text{C}$ , влажность пара 0,2%,  $\text{pH} = 7$ , концентрация кислорода  $\text{O}_2$  15 мкг/кг, внутренний диаметр  $D = 378$  мм; амин – аммиак; коэффициент Келлера  $K_e = 0,04$ ; содержание как Mo, так и Cu 0,03%.

Полученные значения содержания хрома использованы как параметры для прогнозирования процесса ЭКИ на 2013 и 2014 гг. Результат сравнения прогноза и данных контроля приведен на рис. 3. Как видно, результаты прогноза расходятся с фактическими значениями утонений при увеличении длительности эксплуатации даже на таком небольшом интервале времени. Надо сказать, что в данном случае на внутренней поверхности трубопровода уже были значительные отложения продуктов коррозии, так как большинство замеров превышает номинал. Однако расхождение результатов до 60% следует считать существенным. Чтобы получить более обоснованные выводы, необходимо большее количество повторных замеров.

### АНАЛИЗ ДАННЫХ КОНТРОЛЯ НА АЭС С ВВЭР-440

По данным эксплуатационного контроля [16], приведенных в заключениях с ВВЭР-440, рассчитаны значения скоростей коррозии и утонений стенок трубопроводов с однофазной и двухфазной средами в различные периоды эксплуатации. Значения времени эксплуатации  $\tau_{\text{ЭК}}$ , минимальной измеренной толщины стенки  $S_{\text{min}}$ , утонения  $\Delta S_{\text{утн}}$  и скорости ЭКИ  $W_{\text{ЭКИ}}$  приведены в табл. 2 для трубопровода питательной воды (ПВ) и паропровода (ПП). Замеры толщин стенок проведены в период с 1984 по 2008 гг.

Таблица 2

#### Значения утонений и скоростей ЭКИ трубопровода ПВ и паропровода на АЭС с ВВЭР-440 в различные периоды эксплуатации

Питательная вода, 273×16 мм					Паропроводы, 465×16 мм				
Год	$T_{\text{эк}}$ , лет	$S_{\text{min}}$ , мм	$\Delta S_{\text{утн}}$ , мм	$W_{\text{ЭКИ}}$ , мм/г.	Год	$T_{\text{эк}}$ , лет	$S_{\text{min}}$ , мм	$\Delta S_{\text{утн}}$ , мм	$W_{\text{ЭКИ}}$ , мм/г.
1984	3	13,3	2,7	0,9	1985	4	13,2	2,8	0,7
1988	7	13,2	2,8	0,4	1985	4	13,7	2,3	0,575
1989	8	14,1	1,9	0,238	1995	14	13,2	2,8	0,2
1995	14	12,0	4,0	0,286	1995	14	13,2	2,8	0,2
2001	20	12,3	3,7	0,185	2000	19	13,0	3,0	0,158
2005	24	12,2	3,8	0,158	2005	24	13,7	2,3	0,096
2006	25	12,6	3,4	0,136	2005	24	13,7	2,3	0,096
2007	26	13,1	2,9	0,112	2006	25	13,7	2,3	0,092
2008	27	12,0	4,0	0,148	2006	25	13,7	2,3	0,092
2009	28	11,7	4,3	0,154					

Уменьшение утонений в отдельные моменты времени связаны с отложениями продуктов коррозии, тем самым визуально нарушается монотонность процесса износа. Для адекватного прогнозирования процесса ЭКИ необходимо либо внести изменения в модель (модернизировать), либо использовать фильтрацию данных.

Для адаптации ПС ЭКИ-02 и ЭКИ-03 в качестве наиболее значимых, но неизвестных

параметров выбраны концентрация хрома в металле трубопровода и коэффициент Келлера, отражающий геометрию элемента, в том числе, возможно, и состояние внутренней поверхности. Поскольку содержание хрома в металле трубопровода априори неизвестно, то этот показатель взят в качестве переменной. Адаптация ПС выполняется путем прогноза утонений на рассматриваемых элементах и сравнения полученных результатов с фактическими значениями. Концентрация хрома выбирается при наименьшем расхождении вычисленного и измеренного утонений для участка трубопровода ПВ на 1984 г. и участка паропровода на 1985 г. соответственно.

Скорость ЭКИ и утонение принимают максимальное значение при содержании хрома, равном 0,037%, и уменьшаются при больших значениях. В дальнейшем используется значение содержания хрома, равное 0,037%, так как утонение по данным контроля существенное.

Результаты прогноза утонения при содержании хрома 0,037% для участка трубопровода ПВ в диапазоне от трех до 28-ми лет и участка ПП в диапазоне от четырех до 25-ти лет приведены на рис. 4.

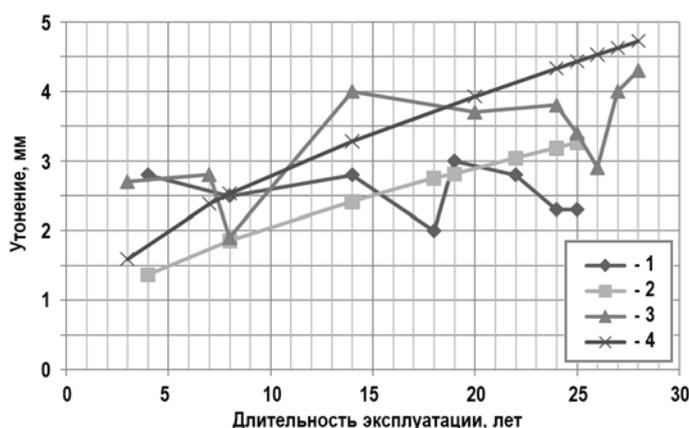


Рис. 4. Данные контроля и результат прогноза для паропровода: 1 – протокол (ПП); 2 – прогноз (ПП); 3 – протокол (ПВ); 4 – прогноз (ПВ)

Из графиков видно, что результаты прогноза плохо согласуются с данными контроля. Одной из причин несоответствия результатов может являться коэффициент Келлера, который при длительной эксплуатации может оказаться зависящим от времени.

В таблицах 3, 4 представлены различные комбинации коэффициента Келлера и содержания хрома, при которых прогноз на первый замер максимально близко совпадает с измеренным для трубопровода ПВ и паропровода соответственно.

Таблица 3  
**Комбинации значений содержания Cr и коэффициента Келлера для паропроводов**

Содержание Cr, %	Ke	Утонение, мм
0,03	0,4699	2,801
0,04	0,5617	2,8021
0,05	0,6535	2,8029
0,06	0,7444	2,8001
0,07	0,8362	2,801
0,08	0,928	2,8017

Таблица 4

**Комбинации значений содержания Cr и коэффициента Келлера для трубопровода ПВ**

Содержание Cr, %	Ke	Утонение, мм
0,03	0,271	2,701
0,04	0,325	2,7109
0,05	0,379	2,718
0,06	0,433	2,7234
0,07	0,487	2,7276
0,08	0,541	2,7309

Несмотря на разнообразие комбинаций коэффициента Келлера и содержания Cr наблюдаются общие тенденции в развитии процесса ЭКИ. На рисунке 5 представлен график соотношения показателей контроля и результатов прогноза для паропровода.

Рис. 5. Данные контроля и результат прогноза для паропровода: 1 – протокол; 2 – прогноз

На основании выполненного анализа можно констатировать расхождение со временем прогнозных и контрольных значений. При этом прогнозная модель дает более консервативную оценку. Для снижения консерватизма необходимо проверить две возможные гипотезы по улучшению прогнозных модели:

- изменение коэффициента Келлера со временем как отражение изменения внутренней поверхности;
- фильтрация данных контроля.

**ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА КЕЛЛЕРА ОТ ВРЕМЕНИ**

Следует ожидать, что на интенсивность процесса ЭКИ влияет изменение шероховатости внутренней поверхности стенок трубопровода, вызванное осаждением и смывом продуктов коррозии с увеличением срока эксплуатации из-за изменения режима потока вблизи стенок. Однако шероховатость по высоте на порядок меньше высоты осажденных продуктов коррозии, следовательно, имеет существенно меньшее влияние на изменение геометрии внутренней поверхности трубопровода. Предположим, что влияние отложений отображается изменением со временем коэффициента Келлера как единственного показателя, отвечающего за геометрию трубопровода в модели Чексала-Гурвица (3).

Использование статистического подхода к оценке тренда утонения не привел к желаемому результату, так как тренд, например, в случае паропровода вообще имел тенденцию к убыванию утонения со временем, для трубопровода ПВ форма регрессии также со временем изменялась на убывание. Это говорит о том, что процессы отложения продуктов коррозии существенно зашумляют реальную картину. В этом случае результаты прогноза превышали данные контроля, и регулирование коэффициентом Келлера сводилось к уменьшению этого коэффициента со временем.

Для регрессии последнего вычислен доверительный интервал по формуле

$$\Delta_{s,t} = t_{n,\beta} \cdot \sqrt{S^2} / \sqrt{n},$$

где  $\Delta_{s,t}$  – величина доверительного интервала;  $\beta$  – доверительная вероятность ( $\beta = 0,95$ );  $n$  – число измерений (размер выборки, в нашем случае 10 и 8);  $t_{n,\beta}$  – квантиль распределения Стьюдента (для  $n = 10$  и  $\beta = 0,95$   $t_{n,\beta} = 2,262$ , а для  $n = 8$  и  $\beta = 0,95$   $t_{n,\beta} = 2,365$ );  $S^2$  – выборочная дисперсия:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f(t_i) - y_i)^2 / (n - 1)},$$

где  $f(t_i)$  – значения коэффициента Келлера по регрессии в момент времени  $t_i$ ;  $y_i$  – значения коэффициента Келлера, полученные из прогноза в момент времени  $t_i$ ;  $t_i$  – срок эксплуатации элемента на момент замера.

На рисунке 6 представлен график соответствия данных контроля и полученных прогнозных значений для аппроксимированного коэффициента Келлера.

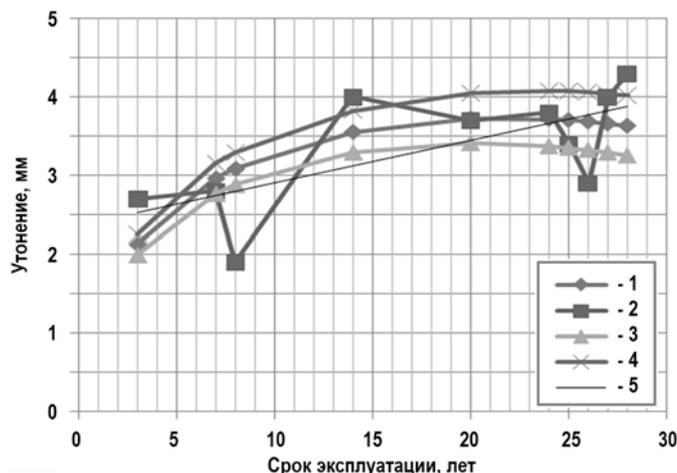


Рис. 6. График соответствия контрольных и прогнозных значений для аппроксимированного коэффициента Келлера (трубопровод ПВ): 1 – прогноз; 2 – контроль; 3 –  $-\Delta$ ; 4 –  $+\Delta$ ; 5 – регрессия ( $y = 0,054x + 2,361$ ;  $R^2 = 0,459$ )

В этом случае построенные аппроксимации удовлетворительно описывают процесс ЭКИ рассматриваемого элемента, особенно нижняя граница ДИ (менее 35%). Однако требуется большое количество повторных замеров для обеспечения точности оценок.

Для паропровода ситуация аналогичная, только скорость снижения утонения со временем у паропровода выше, чем у трубопровода ПВ, что соответствует тенденциям контроля, т.е. отложения продуктов коррозии идут более интенсивно.

### ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ

График изменения толщины стенки (утонения), например, для трубопровода ПВ описан выше (см. рис. 4), но примерно такая же картина с замерами на любом другом элементе. Простая логика говорит о том, что износ – монотонный процесс, и уменьшение утонения связано с отложениями продуктов коррозии, но не с реальным состоянием металла. Другими словами, в точке 8 (лет эксплуатации) реальное утонение должно быть 2,8 (как в точке 7) или больше. Поэтому для устранения от шума, вызванного отложениями, предлагается фильтровать данные контроля так, чтобы нижележащая следующая точка переходила на уровень предыдущей. Тогда сохранится смысл износа, и исчезнут сомнительные выводы о возрастании остаточного ресурса со временем.

Таким образом, значение утонения для данного участка следует брать равным наибольшему предыдущему значению. Любые же последующие утонения, большие предыдущих, следует оставлять без изменений.

Для трубопровода ПВ были найдены экранированные значения и соответствующая им регрессия. По данному уравнению регрессии построены графики соответствия утонений, полученных при контроле, прогнозных данных для значений коэффициента Келлера в диапазоне от 0,16 (значения коэффициента по таблице Келлера для данного элемента) до 0,3 (в предположении, что со временем коэффициент Келлера будет только увеличиваться) и утонений по регрессии экранированных значений (рис. 7).

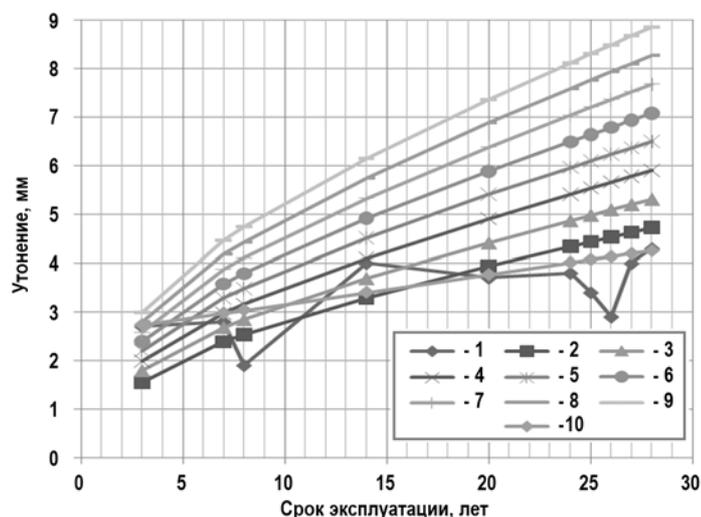


Рис. 7. Соотношение значений утонений, полученных различным путем: 1 – контроль; 2 – Ke = 0,16; 3 – Ke = 0,18; 4 – Ke = 0,20; 5 – Ke = 0,22; 6 – Ke = 0,24; 7 – Ke = 0,26; 8 – Ke = 0,28; 9 – Ke = 0,30; 10 – экранированные значения

Для выбора наилучшего коэффициента Келлера рассчитаны суммы квадратов отклонений прогноза (при разных значениях коэффициента Келлера) в зависимости от регрессии экранированных данных контроля:

$$\sum_{i=1}^n (f(t_i) - y_i)^2,$$

где  $f(t_i)$  – значение экранированного утонения в момент времени  $t_i$ ;  $y_i$  – значение утонения при фиксированном значении коэффициента Келлера в момент времени  $t_i$ ;  $n$  – число измерений (размер выборки  $n = 10$ );  $t_i$  – срок эксплуатации элемента на момент замера.

В таблице 5 представлены результаты расчетов суммы квадратов отклонений для значений экранированного утонения и значений утонения при фиксированных значениях коэффициента Келлера от 0,16 до 0,3, приведен фрагмент расчетов.

Таблица 5

**Суммы квадратов отклонений по экранированным утонениям и утонениям при фиксированных значениях коэффициента Келлера**

Срок, лет	Экранированное, утонение мм	Утонение, мм (Ke = 0,16)	Утонение, мм (Ke = 0,18)	Утонение, мм (Ke = 0,2)	Утонение, мм (Ke = 0,22)	Утонение, мм (Ke = 0,24)
3	2,7357	1,5497	1,794	1,9933	2,1927	2,392
7	2,9789	2,3844	2,6825	2,9805	3,2786	3,5767
8	3,0397	2,529	2,8452	3,1613	3,4774	3,7936
14	3,4045	3,2798	3,6898	4,0998	4,5098	4,9198
20	3,7693	3,928	4,419	4,9101	5,4011	5,8921
24	4,0125	4,3309	4,8723	5,4136	5,955	6,4964
25	4,0733	4,4313	4,9852	5,5391	6,093	6,6469
26	4,1341	4,5298	5,096	5,6622	6,2284	6,7946
27	4,1949	4,6263	5,2046	5,7829	6,3612	6,9395
28	4,2557	4,7235	5,3139	5,9043	6,4948	7,0852
<b>Сумма квадратов отклонений</b>		<b>2,85</b>	<b>6,15</b>	<b>14,04</b>	<b>26,41</b>	<b>43,26</b>

Для паропровода получены аналогичные результаты, только коэффициент Келлера изменяется от 0,23 (значения коэффициента по таблице для данного элемента) до 0,5 (в предположении, что со временем коэффициент Келлера будет только увеличиваться), а уравнение регрессии имеет вид  $y = 0,011t + 2,708$ , где  $t$  – время эксплуатации.

Остаточная сумма квадратов отклонений также минимальна для исходной геометрии элемента. Таким образом, фильтрация данных контроля позволяет без модернизации модели достичь приемлемой точности оценок утонения и остаточного ресурса – 16%.

Сопоставление рассчитанных с помощью ПС значений скоростей ЭКИ и определенных по данным эксплуатационного контроля трубопроводов ПВ АЭС с ВВЭР-440 показало (рис. 8), что прогнозная оценка скорости ЭКИ отличается от оценки по данным контроля не более чем на 12,5%.

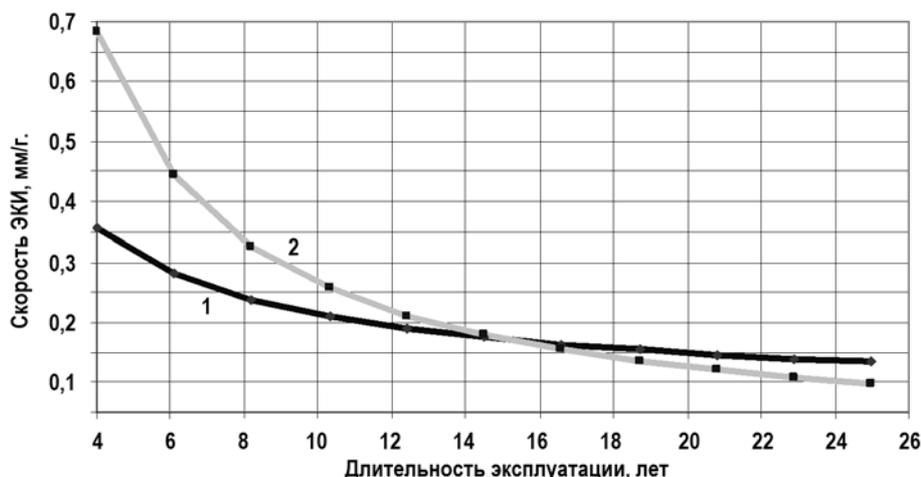


Рис. 8. Значения скорости ЭКИ паропровода по данным замеров и по расчету с помощью ЭКИ-03: 1 – расчёты с использованием ПС; 2 – данные эксплуатационного контроля

На большой временной базе нивелируются значения отложений в ту и другую стороны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ данных контроля элементов трубопроводов питательной воды и паропровода АЭС с РБМК-1000 и ВВЭР-440. На основании данных эксплуатационного контроля показано, что оценки характеристик ЭКИ содержат большую неопределенность из-за отложений продуктов коррозии на внутренней поверхности трубопровода и их миграции в течение эксплуатации. При этом данные прогноза утонений существенно расходятся с контрольными данными при больших сроках эксплуатации, что вызвано влиянием отложений продуктов коррозии, фиксируемым при контроле совместно с основным металлом.

Для адаптации прогнозных моделей ЭКИ-02 и ЭКИ-03 к данным контроля в условиях неопределенности рассмотрены два подхода – модернизация прогнозной модели путем изменения коэффициента Келлера и фильтрация данных контроля без изменения модели.

Показано, что фильтрация данных позволяет улучшить качество прогноза утонения по рассматриваемой модели без её модернизации с расхождением прогноза и данных контроля не более 16%.

Показано, что расчет скорости ЭКИ по данным контроля адекватно отражает реальность, причем с увеличением времени эксплуатации точность прогноза возрастает (погрешность не более 13%).

Полученные результаты позволяют уверенно рекомендовать использовать прогнозные модели ЭКИ-02.1 и ЭКИ-03.1 как на стадии проектирования АЭС, так и в процессе эксплуатации для принятия решений о сроках и объемах контроля.

### Литература

1. Бараненко В.И., Гулина О.М., Сальников Н.Л., Мурзина О.Э. Обоснование расчетов скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса трубопроводов АЭС по данным эксплуатационного контроля. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 55-65.
2. Bridgeman J., Shankar R. Erosion/corrosion data handling for reliable NDE. // Nuclear Eng. and Design. – 1991. – Vol. 131. – PP. 285-297.
3. Lee S.H., Kim T.R., Jeon S.C., Hwang K.M. Thinned Pipe Management Program of Korean NPPs. // Trans. of the XVII-th Intern. Conf. on Structure Mech. in Reactor Technology (SmiRT 17). Prague, Czech Republic. August 17-22, 2003. – PP. 1-8.
4. Moolayil T.M. Mitigation of degradation of high energy secondary cycle piping due to FAC and life management in Indian NPPs. // Second Intern. Symposium on Nuclear Power Plant Life Management from 15 - 18-th October, 2007 at Shanghai, China. – 48 p.
5. Мулайил Т.М. К вопросу о коррозии под действием потока. // Атомная техника за рубежом. – 2008. – № 12. – С. 16-21.
6. 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. – № 2. – С. 55-63.
7. ТУ 14-3-460-75: Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1976, 87 с.
8. Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4). EPRI/ 3002000563. Technical Report, November 2013. EPRI. 94 p.
9. Бараненко В.И., Нафтали М.М., Полях В.И. Влияние отложений продуктов коррозии на эрозионно-коррозионный износ трубопроводов на АЭС. /2013: Краткие результаты научно-технической деятельности ВНИИАЭС. – М.: ВНИИАЭС, 2014. – С. 154-161.
10. Chexal Bindi, Horowitz Jeffery, Bouchacourt Michel et al. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants. TR-106611-R1. EPRI Energy Conversion. – 1998. – 504 p.
11. Бараненко В.И., Гулина О.М., Сальников Н.Л. Расчет скорости коррозии и остаточного ресурса элементов трубопроводов АЭС по данным контроля. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 83-94.
12. Ruscak M., Kaplan J., Kadecka P. Complex Approach to the Lifetime Evaluation of WWER secondary Piping due to Erosion/Corrosion. // Proceed. of the IAEA Specialists Meeting on Erosion/Corrosion of Nuclear Power Plant Components. – Russian Federation, Vladimir. Sept. 13-16, 1996. – PP. 24-30.
13. Гулина О.М., Фролова О.О. Прогнозирование ресурса оборудования АЭС в условиях эрозионно-коррозионного износа на основе эмпирической модели. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 57-65.
14. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010. Нормы допускаемых толщин элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе. – М.: ВНИИАЭС, 2012. – 104 с.
15. 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. – PP. 231-243.
16. РД 27.28.05.061-2009. Методические указания по проведению контроля элементов оборудования и трубопроводов АЭС, подверженных эрозионно-коррозионному износу. – М.: ВНИИАЭС, 2010. – 39 с.

Поступила в редакцию 15.10.2019 г.

### Авторы

Бараненко Валерий Иванович, профессор, доктор технических наук  
E-mail: baranenko\_vi@mail.ru

Гулина Ольга Михайловна, профессор, доктор технических наук  
E-mail: omgulina18@mail.ru

Мионов Сергей Андреевич, инженер  
E-mail: samironov@iate.obninsk.ru

Сальников Николай Леонидович, профессор, доктор технических наук  
E-mail: salnickovnickolay@yandex.ru

UDC 621.311.25:621.039.620.193.1

## REPEATED MEASUREMENTS AND QUALITY OF ASSESSMENTS IN THE ANALYSIS OF NPP PIPELINES EROSION-CORROSION WEAR

Baranenko V.I.\* , Gulina O.M.\*\* , Mironov S.A.\*\*\* , Salnikov N.L.\*\*\*

\* All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operations  
(«VNIIAES JSC»)

25 Ferganskaya Str., 109507 Moscow, Russia

\*\* Federal State Unitary Enterprise OKB Hidropress

21 Ordzhonikidze Str., 142103 Podolsk, Moscow Reg., Russia

\*\*\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI

1 Stugorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

### ABSTRACT

The article describes a study carried out on carbon steel pipe elements subject to erosion-corrosion wear (ECW). Based on the repeated control data, the authors present the results of calculating the characteristics of the ECW: wall-thinning and ECW rate. It is shown that such estimates contain great uncertainty due to the deposits of corrosion products on the pipeline inner surface and their migration during operation. In addition, with an increase in the operating time, for example, when the lifetime is extended, the difference between the forecast and the results of control becomes larger. This means that the error in the estimates of the residual lifetime also increases. The study is based on the data of wall thickness measurements of the feed water pipe (273×16 mm) and steam pipe (465×16 mm) of nuclear power plants with VVER-440 reactors, for which a sufficient number of repeated measurements were performed over a large time interval. An analysis is made of the error in estimating the pipeline wall-thinning and ECW rate using Chexal-Horowitz Flow-Accelerated Corrosion (FAC) Model (ECW-02 and ECW-03 software tools). The estimate of the ECW rate according to the above forecast model differs from the estimate according to the current control data by no more than 12.5%, since the deposits of corrosion products on the pipeline inner surface wall are leveled at a large time base. When calculating the wall-thinning, due to the obvious filtering of the control data, it is possible to achieve an acceptable accuracy of estimates, i.e., about 16% without upgrading the model.

**Key words:** erosion-corrosion wear, lifetime estimation, Keller coefficient, data filtration, repeated control data, erosion-corrosion rate estimation, Chexal-Horowitz Flow-Accelerated Corrosion Model.

### REFERENCES

1. Baranenko V.I., Gulina O.M., Salnikov N.L., Murzina O.E. Substation of FAC rate and service life estimation under operation control data. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*,

- 2016, no. 2, pp.55-65 (in Russian).
2. Bridgeman J., Shankar R. Erosion/corrosion data handling for reliable NDE. *Nuclear Eng. And Design*, 1991, v. 131, pp. 285-297.
  3. Lee S.H., Kim T.R., Jeon S.C., Hwang K.M. Thinned Pipe Management Program of Korean NPPs. *Proc. of the XVII-th Intern. Conf. on Structure Mech. in Reactor Technology (SmiRT 17)*. Prague, Czech Republic. August 17-22, 2003, pp. 1-8.
  4. Moolayil T.M. Mitigation of degradation of high energy secondary cycle piping due to FAC and life management in Indian NPPs. *Second International Symposium on Nuclear Power Plant Life Management from 15-18-th October, 2007 at Shanghai China*. 48 p.
  5. Moolayil T.M. On the issue of flow corrosion. *Atomnaya Tekhnika za Rubezhom*, 2008, no. 12, pp. 16-21 (in Russian).
  6. Baranenko V.I., Yanchenko Yu.A., Gulina O.M., Dokukin D.A. Estimation of erosion-corrosion wear rate and residual lifetime for NPP piping. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*, 2010, no. 2, pp. 55-63 (in Russian).
  7. TU 14-3-460-75: Seamless steel pipes for steam boilers and pipelines. Moscow. CNIIAtominform, 1976, 87 p. (in Russian).
  8. Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4). EPRI/3002000563. Technical Report, November 2013. EPRI. 94 p.
  9. Baranenko V.I., Naftal' M.M., Polyakh V.I. The effect of deposits of corrosion products on erosion-corrosion wear of pipelines at nuclear power plants. *2013: Brief results of scientific and technical activities of VNIIAES*. Moscow. VNIIAES Publ., 2014, pp. 154-161 (in Russian).
  10. Chexal Bindi, Horowitz Jeffery, Bouchacourt Michel et al. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants. TR-106611-R1. EPRI Energy Conversion. 1998. 504 p.
  11. Baranenko V.I., Gulina O.M., Salnikov N.L. Flow-accelerated corrosion rate and residual life time estimation for the components of pipeline systems at nuclear power plants based on control data. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2017, no. 4, pp. 83-94 (in Russian).
  12. Ruscak M., Kaplan J., Kadecka P. Complex Approach to the Lifetime Evaluation of WWER secondary Piping due to Erosion/Corrosion. *Proc. of the IAEA Specialists Meeting on Erosion/Corrosion of Nuclear Power Plant Components*. – Russia, Vladimir. Sept. 13-16, 1996, pp. 24-30.
  13. Gulina O.M., Frolova O.O. Prediction of NPP equipment lifetime under the conditions of erosion-corrosion wear based on an empirical model. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*, 2012, no. 1, pp. 57-65 (in Russian).
  14. Guidance document RD EO 1.1.2.11.0571-2010. *Norms of allowable thicknesses of pipelines elements made of carbon steel during erosion-corrosion wear*. Moscow. VNIIAES Publ., 2012, 104 p. (in Russian).
  15. 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, pp. 231-243.
  16. Guidance document RD 27.28.05.061-2009 *Guidelines for monitoring elements of equipment and pipelines of nuclear power plants subject to erosion and corrosion wear*. Moscow. VNIIAES Publ., 2010, 39 p.

#### Authors

Baranenko Valery Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: baranenko\_vi@mail.ru

Gulina Olga Mikhailovna, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: omgulina18@mail.ru

Mironov Sergey Andreevich, Engineer

E-mail: samironov@iate.obninsk.ru

Salnikov Nikolay Leonidovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: salnickovnickolay@yandex.ru