

РАСЧЕТ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ

В.И. Бараненко*, **О.М. Гулина****, **Н.Л. Сальников****

* *ВНИИАЭС, 109507, Москва, ул. Ферганская, 25*

** *Обнинский институт ядерной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ) 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

Р

К настоящему времени на АЭС накоплено большое количество данных, связанных с неразрушающим эксплуатационным контролем. Для обеспечения надежной эксплуатации энергоблоков, оптимизации объема и периодичности эксплуатационного контроля необходимо продолжить разработку руководящих документов, программных средств, методических указаний и рабочей документации [1 – 3].

Рассматриваются подходы к оценке скорости эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) по данным контроля. Исследование выполнено на данных толщинометрии различных элементов трубопроводов АЭС с разными типами реакторных установок. Развитие идей работы [4] позволило выявить особенности процесса ЭКИ на прямых участках, гйбах и околошовных зонах трубопроводов АЭС с ВВЭР и РБМК. Наличие процесса отложений продуктов коррозии на внутренней поверхности стенки трубопровода приводит к тому, что остаточный ресурс элементов оборудования в условиях отложений формально возрастает. Однако реальное состояние стенки под слоем отложений неизвестно так же, как неизвестна и начальная ее толщина. Выполненное исследование направлено на обоснование методики расчета скорости ЭКИ по данным контроля с целью приближения результатов вычислений к реальности с сохранением необходимой их консервативности.

Выработан единообразный подход к оценке скорости ЭКИ в рассмотренных элементах трубопроводов. На основе данных контроля и отраслевых стандартов предложены методики оценки поправочных коэффициентов, учитывающих технологические допуски на размер, особенности геометрии элемента, а также влияние отложений на результаты замеров толщин.

Проведенные исследования показали эффективность разработанных процедур для околошовных зон. Для гйбов на примере однородной выборки проведен анализ известных и разработанных процедур и выполнено их ранжирование по критерию «консервативность оценки остаточного ресурса».

Введение поправочных коэффициентов позволяет повысить консервативность расчетов ресурсных характеристик по сравнению с расчетами на основании номинальных толщин; результат зависит от типоразмера элемента, его геометрии, а также от типа реакторной установки.

Ключевые слова: эрозионно-коррозионный износ, толщинометрия, оценка скорости ЭКИ, гйбы, сварные соединения, остаточный ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование методики расчета скорости ЭКИ для элементов трубопроводных систем АЭС, изготовленных из углеродистых сталей, требует качественного анализа данных контроля и учета значительного количества факторов [5]. Введение дополнительных коэффициентов, учитывающих технологию изготовления трубопроводов и влияние отложений на значения исходной и минимальной толщин [4], приводит к существенному изменению оценок скорости ЭКИ и остаточного ресурса, что обеспечивает определенную консервативность расчетов и дает резерв времени для проведения повторного контроля.

Приведенная в работе [4] методика оценки скорости ЭКИ применима к расчету прямых участков трубопроводов:

$$W_{\text{утн1}} = [(S_{\text{ном}} \cdot K_{11} \cdot K_{12} - S_{\text{мин}} \cdot K_2)] K_{\text{без}} / \Delta t_0, \quad (1)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная толщина стенки; K_{11} – коэффициент, учитывающий положительный допуск на толщину стенки при изготовлении трубопровода; K_{12} – коэффициент, учитывающий вклад отложений продуктов коррозии в номинальную толщину стенки; K_2 – коэффициент, учитывающий вклад отложений продуктов коррозии при замере минимальной толщины стенки ($S_{\text{мин}}$); $K_{\text{без}}$ – коэффициент безопасности; Δt_0 – длительность эксплуатации элемента до даты проведения контроля. Геометрические особенности таких элементов, как гибы и околшовные зоны [5, 6], возможно, потребуют корректировки данной методики и учета фактической толщины этих элементов.

Задачей исследования является разработка методик оценки скорости ЭКИ с учетом геометрических особенностей таких элементов, как гибы и сварные соединения.

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СКОРОСТИ ЭКИ

Определение корректирующего коэффициента для гибов. При расчетах скорости ЭКИ растянутой гнутой части отводов трубопроводов в качестве значения номинальной толщины $S_{\text{ном}}$ в формулу (1) следует подставлять толщину, измеренную при предпусковом контроле, в противном случае для расчета толщины растянутой гнутой части отводов $S_{\text{гиб}}$ необходимо использовать зависимость [7, 8]

$$S_{\text{гиб}} = S_{\text{ном}} (R - 0,2D) / (R + 0,3D), \quad (2)$$

где R – радиусгиба трубопровода, мм; D – наружный диаметр трубопровода, мм; $S_{\text{гиб}}$ – толщина растянутой частигиба, мм.

С использованием зависимости (2) вводится коэффициент

$$K_{\text{гиб}} = 1 - [0,5(1 - S_{\text{гиб}} / S_{\text{ном}})]. \quad (3)$$

Зависимость (3) учитывает, что максимальное утонение может находиться на участке, расположенном вне растянутой частигиба.

Определение корректирующего коэффициента для околшовных зон. На энергоблоках АЭС имеется большое количество сварных стыковых соединений (околшовных зон – ОШЗ). В таблице 1 приведено количество арматуры, устанавливаемой на энергоблоках АЭС с ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000, РБМК-1500. На каждом элементе имеются два стыковых соединения (СС), а на каждом из них – две околшовные зоны. Кроме элементов арматуры, значительное количество ОШЗ содержится в трубопроводных системах. В практике эксплуатации энергоблоков АЭС фиксировались случаи разрыва ОШЗ трубопроводов АЭС по причине ЭКИ [9].

На прямых участках трубопроводов и на ОШЗ с внешним диаметром менее 108 мм исходная толщина совпадает с номинальной. На ОШЗ с внешним диаметром более 108 мм в соответствии с ОСТ 24.125.31-89 выполняются технологические расточки, создающие ус-

ловия для качественной стыковки трубопроводов при сварке. Расточка выполняется на входной и выходной ОШЗ на участке длиной 50 мм [10].

Таблица 1
Количество арматуры, устанавливаемой на энергоблоках АЭС с ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000, РБМК-1500

Наименование элемента	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	РБМК-1000		РБМК-1500	
			нчт. блок	чет. блок	нчт. блок	чет. блок
Задвижки	74	246	1820	1145	886	886
Клапаны запорные	5448	6519	8715	8714	8135	7849
Регулирующая арматура	80	126	352	265	789	788
Предохранительная арматура	65	172	135	135	119	119
Обратная арматура	338	421	609	429	896	896
Итого	6005	7484	11631	10688	10825	10538

Толщина S_k , определяющая толщину стенки в зоне СС на длине 50 мм, имеет меньшую величину, чем рассчитанная по диаметру расточки толщина расточки S_p^* , в среднем примерно в 1,3 раза. При проведении эксплуатационного контроля толщина S_k может приниматься в качестве минимально допустимой.

Значения S_k в зоне расточки для ОШЗ различных типоразмеров, толщин номинальных и расточек S_p^* , рассчитанные по диаметрам расточек [10], приведены в табл. 2. Толщина расточки S_p^* должна приниматься в качестве исходной для ОШЗ с внешними диаметрами не менее 108 мм. Замеры толщин стенок ОШЗ проводятся в сечениях, расположенных на расстоянии менее 50 мм от сварного шва. Для давлений 3,92, 5,89, 8,44, 11,77 МПа среднее значение отношения $S_p^*/S_{ном}$ равно 0,9. Таким образом, в качестве номинальной или исходной толщины можно использовать $0,9S_{ном}$. Для определения коэффициентов K_{12} и K_2 необходимо располагать средними значениями толщин стенок трубопроводов, которые могут быть рассчитаны на основании данных эксплуатационного контроля. Расчеты средних толщин проводятся для трубопроводов, минимальные толщины которых меньше исходных. Средние толщины стенок определяются по зависимости

$$S_{ср} = \sum S_i / n_{зам} , \quad (4)$$

где S_i – толщина стенки в i -ой точке замеров; $n_{зам}$ – количество точек замеров.

При расчете коэффициентов K_{12} и K_2 определяется
 – разность средней и исходной (номинальной) толщины

$$\Delta S_{исх} = S_{ср} - S_{исх}; \quad (5)$$

– коэффициент K_{12}

$$K_{12} = (S_{исх} - \Delta S_{исх}) / S_{исх} \quad (6)$$

(если $S_{ср} < S_{исх}$, разность величин будет отрицательной, а значение K_{12} – больше единицы);

– коэффициент K_2

$$K_2 = (S_{мин} - \Delta S_{исх}) / S_{мин} . \quad (7)$$

Расчет скорости ЭКИ и остаточного срока эксплуатации. Скорость коррозии, усиливаемой потоком $W_{утн}$ рассчитывается по уравнению (1), номинальные толщины заменяются на соответствующие значения $S_{гиб}$ для гибов и $0,9S_{ном}$ для околосшовных зон. Остаточный срок эксплуатации элемента трубопровода рассчитывается по уравнению

$$\tau = (S_{мин} - S_{доп}) / W_{утн} , \quad (8)$$

где $S_{\text{доп}}$ – минимально допустимая толщина стенки элемента [11, 12].

Таблица 2
Толщины расточек и номинальные, отношения толщин $S_p^*/S_{\text{НОМ}}$ и S_k/S_p^* для контрольных давлений и температур

$p = 3,92 \text{ МПа}, T = 200^\circ\text{C}$						$p = 5,89 \text{ МПа}, T = 275^\circ\text{C}$				
№	$D_H \times S_{\text{НОМ}}$, мм	S_p^* , мм	S_k , мм	S_k/S_p^*	$S_p^*/S_{\text{НОМ}}$	$D_H \times S_{\text{НОМ}}$	S_p^* , мм	S_k , мм	S_k/S_p^*	$S_p^*/S_{\text{НОМ}}$
1	108×6	5,5	3,6	0,655	0,917	108×6	5,5	3,7	0,673	0,917
2	133×6,5	5,5	3,7	0,673	0,846	133×6,5	5,5	3,7	0,673	0,846
3	159×7	5,5	4,0	0,727	1,071	159×7	5,5	4,0	0,727	0,786
4	219×9	7,5	5,5	0,733	0,944	219×9	7,5	5,5	0,733	0,833
5	273×10	8,5	6,5	0,765	1,100	273×10	8,5	6,5	0,765	0,850
6	325×13	11	8,5	0,773	0,885	325×13	11,5	9,0	0,783	0,885
7	377×13	11,5	9,0	0,783	0,962	426×14	12,5	9,0	0,720	0,893
8	426×14	12,5	9,8	0,784	0,893	465×16	14,0	10,8	0,771	0,875
9	465×16	14	10,8	0,771	0,875					
10	630×17	16	14,0	0,875	0,941					
11	Min			0,655	0,846	Min			0,673	0,786
12	Среднее			0,754	0,943	Среднее			0,731	0,861
13	Max			0,875	1,100	Max			0,783	0,917
$p = 8,44 \text{ МПа}, T = 300^\circ\text{C}$						$p = 11,77 \text{ МПа}, T = 250^\circ\text{C}$				
№	$D_H \times S_{\text{НОМ}}$, мм	S_p^* , мм	S_k , мм	S_k/S_p^*	$S_p^*/S_{\text{НОМ}}$	$D_H \times S_{\text{НОМ}}$	S_p^* , мм	S_k , мм	S_k/S_p^*	$S_p^*/S_{\text{НОМ}}$
1	108×6	5,5	3,7	0,673	0,917	108×8	6,5	4,7	0,723	0,813
2	133×8	7	5,8	0,829	0,875	133×8	7	5,8	0,829	0,875
3	159×9	8,5	6,9	0,812	0,944	159×9	8,5	6,9	0,812	0,944
4	219×13	12	9,5	0,792	0,923	219×13	12	9,5	0,792	0,923
5	273×16	14,5	11,8	0,814	0,906	273×16	14,5	11,8	0,814	0,906
6	325×19	17,5	14,2	0,811	0,921	325×19	17,5	14,2	0,811	0,921
7	426×24	22	18,5	0,841	0,917	530×28	25	19,0	0,76	0,893
8	530×28	25	19,0	0,760	0,893					
9	630×25	24	22,0	0,917	0,960					
10	Min			0,673	0,875	Min			0,723	0,813
11	Среднее			0,805	0,917	Среднее			0,791	0,896
12	Max			0,917	0,960	Max			0,829	0,944

РАСЧЕТ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОКОЛОШОВНЫХ ЗОН ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

В таблицах 3, 4 приведены значения толщин стенок в окружных точках (рис. 1) 16-ти входных и выходных ОШЗ напорных трубопроводов ПЭН и АПЭН, минимальных, средних и максимальных толщин, количество замеров с толщинами, меньшими номинальных, и толщин расточек ОШЗ на трубопроводе типоразмера 426×24 мм. Замеры толщин проведены в восьми точках по окружности ОШЗ.

В осевом направлении замеры проведены в одном сечении с шагом 45° (в «часах» 12:00, 1:30, 3:00, 4:30, 6:00, 7:30, 9:00 и 10:30). В соответствии с рис. 1 замеры проводятся в зонах с толщиной стенки, определяемой диаметром расточки. В данном случае

толщина расточки должна составлять 21,6 мм. В таблице 3 приведены замеры входных участков ОШЗ, в табл. 4 – выходных.

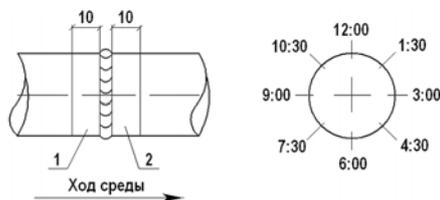


Рис. 1. Схема замеров толщин стенок ОШЗ в восьми точках по окружности: 1 – входная зона; 2 – выходная зона

Таблица 3
Толщины стенок в окружных точках входных ОШЗ, минимальные, средние и максимальные толщины, количество замеров толщин, меньших $S_{ном}$ и S_p^*

№	Значения толщин в окружных точках, мм								Значения толщин			Кол. замеров	
	12:00	1:30	3:00	4:30	6:00	7:30	9:00	10:30	Min	Среднее	Max	< 24 мм	< 21,6 мм
1	22,9	23,7	23,0	22,6	22,7	22,6	22,4	24,2	22,4	23,1	24,2	7	0
3	22,1	23,4	22,4	21,5	21,9	23,8	24,9	24,4	21,5	23,1	24,9	6	1
5	22,2	24,5	24,2	22,7	22,2	22,8	20,4	21	20,4	22,5	24,5	6	2
7	22,9	24,2	23,9	24,8	23,2	24,7	24,6	24,7	22,9	24,1	24,8	3	0
9	22,3	24	25,2	23,6	21,8	23,5	23,2	21,9	21,8	23,2	25,2	6	0
11	20,8	21,8	22,5	22,8	22,4	21,9	22,1	21,4	20,8	22,0	22,8	8	2
13	24,8	24,4	21,5	20,9	22,3	21,6	21,5	22,7	20,9	22,5	24,8	6	3
15	22,2	22	21,9	21,8	21,4	20,6	20,1	20,7	20,1	21,3	22,2	8	4
Min	20,8	21,8	21,5	20,9	21,4	20,6	20,1	20,7	20,1	21,3	22,2	50	12
Среднее	22,5	23,5	23,1	22,6	22,2	22,7	22,4	22,6	21,4	22,7	24,2	78,1%	18,8%
Max	24,8	24,5	25,2	24,8	23,2	24,7	24,9	24,7	22,9	24,1	25,2		

Таблица 4
Толщины стенок в окружных точках выходных ОШЗ, минимальные, средние и максимальные толщины, количество замеров толщин, меньших $S_{ном}$ и S_p^*

№	Значения толщин в окружных точках, мм								Значения толщин			Кол. замеров	
	12:00	1:30	3:00	4:30	6:00	7:30	9:00	10:30	Min	Среднее	Max	< 24 мм	< 21,6 мм
2	22,6	20,5	20,9	22,2	23,3	23,1	22,2	23,8	20,5	22,3	23,8	8	2
4	22,2	22,4	22,6	25,4	25,5	21,3	21,4	20,3	20,3	22,6	25,5	6	3
6	20,2	21,1	24,2	24,9	24,1	22,2	21	21,4	20,2	22,4	24,9	5	4
8	25,5	23,8	23,8	24	23,5	23,1	22	23,6	22,0	23,7	25,5	6	0
10	25,3	24,1	22,4	24,9	24,8	24,4	24,2	25,5	22,4	24,5	25,5	1	0
12	22,3	21,4	21,8	22,1	22,4	22,8	22,4	23,3	21,4	22,3	23,3	8	1
14	22,8	23	23,1	23,8	23,7	24,3	24,3	23,6	22,8	23,6	24,3	6	0
16	22,2	22,8	22,3	22,5	24,1	22,5	21,8	21,3	21,3	22,4	24,1	7	1
Min	20,2	20,5	20,9	22,1	22,4	21,3	21	20,3	20,2	22,3	23,3	47	11
Среднее	22,9	22,4	22,6	23,7	23,9	23,0	22,4	22,9	21,4	23,0	24,6	73,4%	17,2%
Max	25,5	24,1	24,2	25,4	25,5	24,4	24,3	25,5	22,8	24,5	25,5		

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

ставляет 78,1 и 73,4% соответственно на входных и выходных ОШЗ. Количество замеров с толщиной стенки менее 21,6 мм (на участке расточки) составляет 18,8 и 17,2% соответственно на входных и выходных ОШЗ.

В таблицах 5, 6 представлены результаты расчетов по формулам (5) – (8). Расчеты скоростей коррозии приведены для ОШЗ, для которых значения минимальных толщин имеют значения, меньшие исходной, равной толщине расточки 21,6 мм. При расчетах коэффициент K_{11} принят равным 1,075, время эксплуатации до проведения замеров – 24 года, минимально допустимая толщина стенки $S_{\text{доп}} = 18,5$ мм.

Таблица 5

Величины, характеризующие ресурсные характеристики входных ОШЗ напорных трубопроводов ПЭН и АПЭН

№	$\Delta S_{\text{исх}} = S_{\text{ср}} - S_{\text{исх}}$, мм	K_{12}	K_2	$S_{\text{мин}}$	$W_{\text{эки1}}$, мм/год	T_1 , лет	$W_{\text{эки2}}$, мм/год	T_2 , лет	T_2/T_1
3	1,5	0,931	0,930	21,5	0,095	20,3	0,074	31,5	1,55
5	0,9	0,958	0,907	20,4	0,163	11,6	0,172	11,7	1,01
11	0,4	0,981	0,949	20,8	0,170	8,6	0,140	13,5	1,56
13	0,9	0,958	0,93	20,9	0,144	7,0	0,129	16,6	2,37
15	-0,3	1,014	0,949	20,1	0,230	2,9	0,205	6,9	2,38
Среднее									1,8

Таблица 6

Величины, характеризующие ресурсные характеристики выходных ОШЗ напорных трубопроводов ПЭН и АПЭН 426×24 мм

№	$S_{\text{мин}}$, мм	K_{12}	K_2	$S_{\text{мин}} \cdot K_2$, мм	Разн	$W_{\text{эки1}}$, мм/год	Ресурс T_1 , лет	$W_{\text{эки2}}$, мм/год	Ресурс T_2 , лет	T_2/T_1
2	20,5	0,968	0,921	18,9	2	0,276	7,24	0,161	12,4	1,71
4	20,3	0,954	0,898	18,2	1,8	0,294	6,12	0,184	9,78	1,60
6	20,2	0,963	0,902	18,2	1,7	0,304	5,59	0,193	8,8	1,57
12	21,4	0,968	0,963	20,6	2,9	0,198	14,64	0,087	33,3	2,27
16	21,3	0,963	0,953	20,3	2,8	0,207	13,5	0,097	28,8	2,13
Среднее										1,86

Таблица 7

Скорости ЭКИ и остаточный ресурс для входных ($W_{\text{эки1}}$) и выходных ОШЗ ($W_{\text{эки2}}$) без учета корректирующих коэффициентов

№	$S_{\text{мин}}$, мм	$W_{\text{эки1}}$, мм/год	T_{11} , лет	№	$S_{\text{мин}}$, мм	$W_{\text{эки2}}$, мм/год	T_{21} , лет	T_{11}/T_1	T_{21}/T_2
3	21,5	0,004	750	2	20,5	0,045	44	23,8	3,5
5	20,4	0,050	38	4	20,3	0,054	33	3,2	3,4
11	20,8	0,033	70	6	20,2	0,058	29	5,2	3,3
13	20,9	0,029	82	12	21,4	0,008	362	4,9	10,8
15	20,1	0,062	25	16	21,3	0,012	233	3,6	8,1
Среднее								8,1	5,8

Оценка остаточного ресурса, полученная по формуле для номинальной толщины $S_{\text{ном}}$ ($W_{\text{эки1}}$ и T_1), в 1,8 раза меньше, чем полученная с учетом расточки ($W_{\text{эки2}}$ и T_2).

Использование вместо $S_{\text{ном}}$ толщины расточки приводит к оценке остаточного ресурса

са примерно в 1,9 раз большей, т.е. аналогично картине для входных ОШЗ. В таблице 7 приведены значения скорости ЭКИ и остаточного ресурса для входных ОШЗ без учета корректирующих коэффициентов, исходная толщина – толщина расточки, равная 21,6 мм.

Анализ табл. 7 показывает, что учет корректирующих коэффициентов выравнивает значения остаточного ресурса за счет косвенного учета отложений на внутренней поверхности элемента трубопровода. Расчет даже с учетом толщины расточки в этом случае дает оценки остаточного ресурса примерно в восемь раз меньше для входных ОШЗ и в 5,8 раз – для выходных. Следовательно, для ОШЗ однозначно рекомендуется методика расчета с учетом корректирующих коэффициентов и использованием в качестве исходной толщины расточки.

Гибы. Для расчета скорости ЭКИ и остаточного ресурса гибов рассмотрим данные замеров на гихах 06-К и 16-К трубопроводов питательной воды 273×16 мм АЭС «Дукованы», выполненных при эксплуатационном контроле в 1995, 1996, 2000 и 2002 гг. Выбор этих гибов обусловлен большим количеством замеров на каждом элементе (от 276 до 394) [13].

$$W_1 = (S_{\text{ном}} - S_{\text{мин}})K_{\text{без}}/\Delta\tau_0 \quad (9)$$

Формула $W_2 = [(S_{\text{ном}} \cdot K_{11} \cdot K_{12} - S_{\text{мин}} \cdot K_2)] \cdot K_{\text{без}}/\Delta\tau_0$ [1] предлагалась для оценки скорости ЭКИ прямых участков трубопроводов. Соответствующие значения скорости ЭКИ W_2 и остаточного ресурса T_2 даются в табл. 8. Среднее значение отношения $T_1/T_2 - 1,5$, т.е. применение корректирующих коэффициентов приводит к снижению оценки остаточного ресурса рассмотренных гибов примерно в 1,5 раза.

Таблица 8

Скорость ЭКИ и остаточный ресурс для гибов без учета (9) и с учетом (1) корректирующих коэффициентов

Гиб	Год	$T_{\text{экс, год}}$	$S_{\text{мин}}$	$S_{\text{ср}}$	ΔS	K_{12}	K_2	W_1	T_1	W_2	T_2	T_1/T_2
06-К	1996	11,7	12,95	16,32	0,32	0,98	0,975	0,236	26	0,329	18,7	1,39
	2002	17,7	13,5	16,13	0,13	0,992	0,990	0,128	52	0,190	35,2	1,47
16-К	1995	10,7	13,84	16,17	0,17	0,989	0,987	0,183	38,4	0,285	24,7	1,55
	1996	11,7	13,95	16,23	0,23	0,985	0,983	0,159	44,9	0,250	28,6	1,56
	2000	15,7	13,76	16,22	0,22	0,986	0,984	0,130	53,5	0,198	35,15	1,52
Среднее											1,5	

Таблица 9

Оценки по формуле (10) скорости ЭКИ и остаточного ресурса для гибов

Гиб	Год	$S_{\text{мин}}$	$S_{\text{ср}}$	ΔS	$0,95 \cdot S_{\text{мин}}$	W_3	T_3	T_3/T_2
06-К	1996	12,95	16,32	0,32	12,3	0,598	10,3	0,55
	2002	13,5	16,13	0,13	12,825	0,368	18,2	0,517
16-К	1995	13,84	16,17	0,17	13,148	0,582	12,1	0,49
	1996	13,95	16,23	0,23	13,25	0,524	13,6	0,475
	2000	13,76	16,22	0,22	13,07	0,401	17,3	0,492

Формула для оценки скорости ЭКИ, приведенная в [11],

$$W_3 = (1,25 \cdot S_{\text{ном}} - 0,95 \cdot S_{\text{мин}})K_{\text{без}}/\Delta\tau_0 \quad (10)$$

также была применена к рассмотренным гихам. Соответствующие значения скорости W_3 и остаточного ресурса T_3 приведены в табл. 9.

В соответствии с формулой (2) толщина растянутой части гиха

$$S_{\text{гиб}} = S_{\text{ном}}(R - 0,2D)/(R + 0,3D),$$

где R – радиусгиба. Для рассматриваемых гибов (90°) $R = 1370$ мм. Тогда $S_{\text{гиб}} = 14,5$ мм, а значение коэффициента $K_{\text{гиб}} = 1 - [0,5 \cdot (1 - S_{\text{гиб}}/S_{\text{ном}})] = 0,953$.

Среднее значение отношения $T_3/T_2 = 0,5$, т.е. расчет скорости ЭКИ по формуле, приведенной в новой редакции РД [11], приводит к снижению оценки остаточного ресурса в два раза относительно формулы для прямых участков с корректирующими коэффициентами.

Формула для расчета скорости ЭКИ с учетом геометриигиба W_4 аналогична (1) с соответствующей заменой $S_{\text{ном}}$ на $S_{\text{гиб}}$:

$$W_4 = [(S_{\text{гиб}} \cdot K_{11} \cdot K_{12} \cdot K_{\text{гиб}} - S_{\text{мин}} \cdot K_2)] \cdot K_{\text{без}} / \Delta\tau_0. \quad (11)$$

Оценка остаточного ресурса при этом (T_4) в 3,5 раза больше, чем при использовании формулы (1) для прямых участков (табл. 10).

Таблица 10

Оценки по формуле (1) скорости ЭКИ и остаточного ресурса для гибов с учетом геометриигиба (W_4 и T_4)

		$S_{\text{мин}}$	$S_{\text{сп}}$	ΔS	K_{12}	K_2	W_4	T_4	T_4/T_2	T_3/T_4
06-K	1996	12,95	16,32	0,32	0,98	0,975	0,205	28,4	2,75	0,362
	2002	13,5	16,13	0,13	0,992	0,990	0,107	61,4	3,37	0,296
16-K	1995	13,84	16,17	0,17	0,989	0,987	0,149	46	3,8	0,263
	1996	13,95	16,23	0,23	0,985	0,983	0,127	54,4	4	0,25
	2000	13,76	16,22	0,22	0,986	0,984	0,106	63,5	3,67	0,272
Среднее									3,5	~ 0,3

Таким образом, остаточный ресурс, посчитанный по РД, примерно в три раза меньше вычисленного по формуле для гибов.

В таблице 11 приведены обобщенные результаты по гибам.

Таблица 11

Остаточный ресурс для гибов (обобщенные результаты)

Гиб	Год замера	$S_{\text{мин}}$	$S_{\text{сп}}$	T_1	T_2	T_3	T_4
06-K	1996	12,95	16,32	26	18,7	10,3	28,4
	2002	13,5	16,13	52	35,2	18,2	61,4
16-K	1995	13,84	16,17	38,4	24,7	12,1	46
	1996	13,95	16,23	44,9	28,6	13,6	54,4
	2000	13,76	16,22	53,5	35,15	17,3	63,5

В результате наиболее консервативная оценка получена при использовании формулы из РД (W_3), наиболее оптимистичная – с корректирующими коэффициентами для гибов (W_4). Разумная консервативность в этом случае – с корректирующими коэффициентами для гибов как для прямых участков (W_2), т.е. без учета геометрии. Однако обосновать это достаточно непросто, поэтому следует использовать все результаты для принятия решения о проведении повторного контроля при приближении к минимальному из рассчитанных времен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методики расчета скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса для гибов и околосшовных зон с учетом корректирующих коэффициентов, учитывающих влияние на процесс коррозии технологии производства и геометрии элементов трубопроводов, а также влияние отложений продуктов коррозии.

2. Разумная консервативность расчетов обеспечена учетом корректирующих коэффициентов и геометрии элементов. Показано, что результаты расчета при этом не явля-

ются излишне пессимистическими.

3. Значения корректирующих коэффициентов, входящих в расчетные зависимости, определяются на основании обработки данных эксплуатационного контроля. Расчеты скорости ЭКИ и остаточного ресурса ОШЗ проводятся с использованием в качестве исходной номинальной толщины и толщины расточки. Использование вместо номинала толщины расточки приводит к оценке остаточного ресурса, примерно в 1,9 раз большей как для входных, так и для выходных ОШЗ напорных трубопроводов ПЭН и АПЭН типоразмера 426×24 мм.

4. Расчет без учета корректирующих коэффициентов для толщины расточки дает оценки остаточного ресурса примерно в восемь раз меньше для входных ОШЗ и в 5,8 раз – для выходных. Следовательно, для ОШЗ однозначно рекомендуется методика расчета с учетом корректирующих коэффициентов и использованием в качестве исходной толщины расточки.

5. Для расчета скорости ЭКИ и остаточного ресурса гибов рассматриваются данные замеров на гихах 06-К и 16-К трубопроводов питательной воды 273×16 мм АЭС «Дукованы», выполненных при эксплуатационном контроле в 1995, 1996, 2000 и 2002 гг. Рассмотрены четыре формулы для расчета скорости ЭКИ: для прямых участков без коррекции, с корректирующими коэффициентами для прямых участков, с корректирующими коэффициентами для гибов и рекомендуемая РД [11]. Неоднозначность выводов требует использовать все результаты для принятия решения о проведении повторного контроля при приближении к минимальному из рассчитанных времен.

Литература

1. Бараненко В.И., Гашенко В.А., Щедеркина Т.Е. Универсальный диагностический признак для оценки износа трубопроводов в околошовных зонах (опыт Запорожской АЭС). // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 64. – № 2. – С. 56-58.
2. Гулина О.М., Сальников Н.Л., Бараненко В.И. Разработка нормативной документации для управления ресурсом оборудования АЭС в условиях эрозионно-коррозионного износа // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – № 3. – С. 273-278.
3. Recommendation for Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4). EPRI/ 3002000563. Technical Report, November 2013. EPRI. – 94 p.
4. Бараненко В.И., Гулина О.М., Сальников Н.Л., Мурзина О.Э. Обоснование расчетов скорости ЭКИ и остаточного ресурса трубопроводов АЭС по данным эксплуатационного контроля. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 55-65.
5. 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.
6. Бараненко В.И., Янченко Ю.А., Гулина О.М. Эксплуатационный контроль трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу. // Теплоэнергетика. – 2009. – № 5. – С. 20-33.
7. Нахалов В.А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 183 с.
8. ОСТ 24.321.26-74, ОСТ 24.321.28-74, ТУ 14-3-460-75. Геометрические характеристики гибов. Утонение растянутой части гибов. Предельные отклонения по толщине стенок трубопроводов. – М.: Госстандарт, 1975. – 8 с.
9. Korhonen R., Hietanen O. Erosion corrosion of parallel feed water discharge lines at the Loviisa VVER-440. Proceed. of specialists meeting organized by the Inter. Atomic Energy Agency. 19-22 Sept. 1994. IAEA Vienna held in Kiev. – Ukraine, 1994. – PP. 73-89.
10. ОСТ 24.125.30-89 – ОСТ 24.125.57-89. Детали и сборочные единицы из сталей перлитного класса для трубопроводов АЭС D = 16-720 мм. Типы, конструкция и размеры. – Л.: Госстандарт, 1989. – 155 с.
11. РД 90 1.1.2.11.0571-2015. Нормы допускаемых толщин элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе. – М.: ВНИИАЭС, 2015. – 210 с.
12. Case of ASME Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning. Section XI, Division 1. Case N-597-2. November 10, 2003. – 13 p.

13. *Rushchak M., Kaplan J., Kadechka 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. – Russian Federation, Vladimir. Sept. 13-16, 1996. – PP. 24-30.*

Получена 20.03.2017 г.

Авторы

Бараненко Валерий Ивынович, профессор, доктор техн. наук
E-mail: VIBaranenko@vniiaes.ru

Гулина Ольга Михайловна, профессор, доктор техн. наук
E-mail: olga@iate.obninsk.ru

Сальников Николай Леонидович, профессор, доктор техн. наук
E-mail: salnikov@iate.obninsk.ru

UDC 621.311.25:621.039.620.193.1

FLOW-ACCELERATED CORROSION RATE AND RESIDUAL LIFE TIME ESTIMATION FOR THE COMPONENTS OF PIPELINE SYSTEMS AT NUCLEAR POWER PLANTS BASED ON CONTROL DATA

Baranenko V.I. *, Gulina O.M. **, Salnikov N.L. **

* All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operations («VNIIAES JSC»). 25 Ferganskaya st., Moscow, 109507 Russia

** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

There is large number of non-destructive operation control data at each NPP units. To prove reliable operation and optimal both volume and period of control it is necessary to develop computer codes, regulatory and modified procedures to estimate FAC rate and residual life time [1, 2, 3]. The paper deals with different approaches to FAC rate estimation based on control data. Some kinds of piping elements from different types of NPP units are researching in this paper. FAC process peculiarities at piping straight parts and welding of NPP units with PWR and BWR are discussed in previous paper [4]. Corrosion products deposit on interior surface of piping leads to residual life time formally to arise. However, real state of piping wall thickness is unknown as well as initial one. Researching performed directs to improve FAC rate estimation procedure on the base of control data to adapt calculation results to real situation according «rational conservatism».

The main idea of paper is to estimate FAC rate in piping elements by the same manner. Besides, there are suggested some procedures to estimate correcting coefficients taking into account technological tolerance on manufacturing, element geometry, corrosion products deposits influence on both initial and minimal wall thickness, based on control data and standards.

Researching performed show the efficiency of procedures developed for welding. For homogeneous sample of bends there was performed analysis of both known and developed procedures. As result the ranking was fulfilled according to criterion «conservatism of residual service life estimation».

Application of correcting coefficients leads to more high conservatism in service life estimation in with using of nominal wall thickness, and result demands on element geometry and size and also on type of NPP unit.

Key words: flow-accelerated corrosion, wall thickness control data, FAC rate

estimation, bends, welding, minimal admissible wall thickness, residual life time.

REFERENCES

1. Baranenko V.I., Gashenko V.A., Shchederkina T.E. Universal'ny diagnostichesky priznak dlya ocenki iznosa truboprovodov v okoloshovnyh zonah (opyt Zaporozhskoj AES). [A general diagnostic feature for evaluating the wear rate of pipelines in the weld-affected zones (field experience at the Zaporozhskaya NPP)]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 1998, v. 64, no. 2, pp. 56-58 (in Russian).
2. Gulina O.M., Salnikov N.L., Baranenko V.I. Razrabotka normativnoy dokumentatsii dlya upravleniya resursom oborudovaniya AES v usloviyah erozionno-korroziionnogo iznosa. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2013, no. 3, pp. 273-278 (in Russian).
3. Recommendation for Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4). EPRI/3002000563. Technical Report, November 2013. EPRI. 94 p.
4. Baranenko V.I., Gulina O.M., Salnikov N.L., Murzina O.E. Obosnovanie raschetov skorosti EKI i ostatochnogo resursa truboprovodov AES po dannym ekspluatatsionnogo kontrolya (Substantiation of FAC rate and service life estimation under operation control data). *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 2, pp. 55-65 (in Russian).
5. Baranenko V.I., Yanchenko Yu. A., Gulina O.M., Dokukin D.A. O raschete skorosti erozionno-korroziionnogo iznosa i ostatochnogo resursa truboprovodov AES. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2010, no. 2, pp. 55-63 (in Russian).
6. Baranenko V.I., Yanchenko Yu. A., Gulina O.M., Tarasova O.S. Ekspluatatsionny kontrol' truboprovodov, podverzhennyh erozionno-korroziionnomu iznosu. *Teploenergetika*. 2009, no. 5, pp. 20-33 (in Russian).
7. Nakhalov V.A. *Nadezhnost' gibov trub teploenergticheskikh ustanovok*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983, 183 p. (in Russian).
8. OST 24.321.26-74, OST 24.321.28-74, TU 14-3-460-75. Geometricheskie kharakteristiki gibov. Utonenie rastyanutoy chasti gibov. Predel'nye otkloneniya po tolshchine stenok truboprovodov. Moscow. Gosstandart Publ., 1975, 8 p. (in Russian).
9. Korhonen R., Hietanen O. Erosion-corrosion of parallel feed water discharge lines at the Loviisa VVER-440. Proceed. of Specialists Meeting Organized by the Inter. Atomic Energy Agency. 19-22 Sept. 1994. IAEA Vienna held in Kiev. Ukraine, Kiev, 1994, pp. 73-89 (in Russian).
10. OST 24.125.30-89 – OST 24.125.57-89. Detali i sborochnye editsy iz staley perlitnogo klassa dlya truboprovodov AES D=16-720 mm. Tipy, konstruktsiya i razmery. Leningrad. Gosstandart Publ., 1989, 155 p. (in Russian).
11. RD EO 1.1.2.11.0571-2015 «Normy dopuskaemyh tolschin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistykh ctaley pri erozionno-korroziionnom iznose» [Norms of admissible wall thickness for carbon steel piping under flow accelerated corrosion]. Moscow. VNIIAES Publ. 2012, 210 p. (in Russian).
12. Case of ASME Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning. Section XI, Division 1. Case N-597-2. November 10, 2003. 13 p.
13. Rushchak M., Kaplan J., Kadechka 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. Russian Federation, Vladimir. Sept. 13-16, 1996, pp. 24-30 (in Russian).

Authors

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

E-mail: VIBaranenko@vniiaes.ru

Gulina Ol'ga Mikhajlovna, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: olga@iate.obninsk.ru

Sal'nikov Nikolaj Leonidovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: salnikov@iate.obninsk.ru