

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТОВ СКОРОСТИ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ АЭС ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

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

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

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1



Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) – сложный механизм повреждения элементов оборудования и трубопроводов АЭС. ЭКИ определяется такими факторами, как коррозия металла, гидродинамика потока, геометрия элементов оборудования и трубопроводов, используемый водно-химический режим (ВХР), длительность эксплуатации, химический состав металла, толщина отложений продуктов коррозии и др. Рассмотрены подходы к оценке скорости ЭКИ по данным контроля. Исследование направлено на обоснование методики расчета скорости ЭКИ в условиях неопределенности, связанной с методикой и средствами контроля. Отсутствие методики расчета скорости ЭКИ не позволяет верифицировать расчетные программы, а также использовать РД о минимально допустимых толщинах [1] для оценки остаточного ресурса.

Обработка данных замеров позволила определить основные показатели эрозионно-коррозионного процесса, такие как значения утонений и утолщений, скоростей уменьшения и увеличения толщин стенок, остаточного срока эксплуатации трубопроводов до момента достижения минимально допустимых толщин. Уменьшение толщин определяется коррозией металла, увеличение – формированием отложений продуктов коррозии.

Параллельно с процессом утонения стенок вследствие ЭКИ идет процесс отложения продуктов коррозии на внутренней поверхности элемента. Наличие этого процесса приводит к тому, что остаточный ресурс элементов оборудования в условиях отложений формально возрастает. Однако реальное состояние стенки под слоем отложений и ее начальная толщина неизвестны. Для приближения результатов расчетов к реальности необходимо использовать обоснованную методику расчета скорости ЭКИ по данным контроля. Проведенное исследование позволило предложить методику расчета скорости ЭКИ с учетом технологических допусков на размер и влияния отложений на начальные и минимальные толщины. Для расчета остаточного ресурса введен коэффициент безопасности, учитываемый по той же причине в международной практике.

Введение поправочных коэффициентов позволяет повысить консервативность расчетов ресурсных характеристик примерно в 2,5 раза по сравнению с расчетами на основании номинальных толщин.

Ключевые слова: эрозионно-коррозионный износ, отложения продуктов коррозии, данные толщинометрии, методика расчета скорости ЭКИ, остаточный ресурс, минимально допустимые толщины.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет скорости ЭКИ по данным контроля содержит много неопределенностей, связанных с наличием отложений на внутренней поверхности элементов трубопроводов, т.к. замеры на влажном трубопроводе соответствуют совместной толщине стенки и отложений. Проблема усугубляется и тем, что отсутствуют данные входного контроля толщин стенок элементов оборудования. В настоящее время в зарубежных источниках практически отсутствуют данные о влиянии отложений продуктов коррозии на замеры толщин стенок трубопроводов. Тем не менее, в ТУ 14-3-400-75 указаны технологические допуски на изготовление трубопроводов. Все эти факторы существенным образом могут влиять на оценку ресурса оборудования.

Целью данной работы является обоснование методики расчета скорости ЭКИ в условиях указанной неопределенности по данным контроля.

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ СКОРОСТИ ЭКИ НА ЗАРУБЕЖНЫХ И РОССИЙСКИХ АЭС

В работе [6] приведены четыре расчетные зависимости по определению скорости утонения стенок.

1. Расчет скорости износа (утонения) стенки проводится по формуле

$$W_{\text{утн1}} = (S_{\text{ном}} - S_{\text{мин}}) / \Delta\tau_0, \quad (1)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная толщина, мм; $S_{\text{мин}}$ – минимальная толщина, мм; $\Delta\tau_0$ – интервал времени от даты ввода элемента в эксплуатацию до даты проведения контроля, лет.

2. Расчет скорости износа стенки проводится с использованием максимальных и минимальных толщин в одних и тех же точках, определенных при эксплуатационном контроле:

$$W_{\text{утн2}} = (S_{\text{макс}} - S_{\text{мин}}) / \Delta\tau_1, \quad (2)$$

где $S_{\text{макс}}$ – максимальная толщина, мм.

3. Расчет скорости износа стенки проводится с использованием толщин, определенных при предыдущем и последующем эксплуатационном контроле, по соотношению

$$W_{\text{утн3}} = (S_{\text{мин1}} - S_{\text{мин2}}) / \Delta\tau_1, \quad (3)$$

где $S_{\text{мин1}}$ – значение минимальной толщины при предыдущем контроле, мм; $S_{\text{мин2}}$ – значение минимальной толщины при последующем контроле, мм; $\Delta\tau_1$ – интервал времени между датами эксплуатационных контролей, лет.

4. Расчет скорости износа стенки проводится с использованием средних толщин, определенных при предыдущем и последующем эксплуатационных контролях:

$$W_{\text{утн4}} = (S_{\text{ср1}} - S_{\text{ср2}}) / \Delta\tau_1, \quad (4)$$

где $S_{\text{ср1}}$ – значение средней толщины при предыдущем контроле, мм; $S_{\text{ср2}}$ – значение средней толщины при последующем контроле, мм.

Остаточный срок эксплуатации трубопровода до достижения минимально допустимой толщины рассчитывается по уравнению

$$\Delta\tau_2 = (S_{\text{мин}} - S_{\text{доп}}) / W_{\text{ЭКИ}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{доп}}$ – значение минимально допустимой толщины, мм; $W_{\text{ЭКИ}}$ – скорость износа, рассчитанная по одной из формул (1) – (4), мм/год.

В соответствии с рекомендациями по эффективному управлению износом металла следует ввести коэффициент безопасности $K_{без}$ [9], тогда остаточный срок эксплуатации трубопровода до достижения минимально допустимой толщины

$$\Delta\tau_2 = (S_{мин} - S_R)/W_i \cdot K_{без}, \quad (6)$$

где $K_{без}$ – коэффициент безопасности, минимальное рекомендуемое значение которого в соответствии с рекомендациями [9] равно 1,1.

Приведенные формулы являются базовыми при расчете скорости износа на зарубежных АЭС, однако они обладают рядом недостатков. Уравнение (1), например, предполагает, что толщина стенки до начала эксплуатации является номинальной. Фактически существуют значительные отклонения из-за наличия неучитываемых факторов. Уравнение (2) предполагает, что максимальные и минимальные толщины стенок были измерены в одном и том же месте, и, следовательно, утонение ограничивается локальной областью. Формула консервативна в целом для тройников и патрубков, т.к. эти компоненты часто имеют зоны с толщиной, значительно превышающей номинальную, и, следовательно, ожидается, что максимальные и минимальные показатели имеют большой разброс даже до эксплуатации компонента. Однако эта формула не является консервативной для инспекций, проводимых в зонах, подверженных общему утонению, например, ниже по течению за расходомерами питательной воды. Уравнение (3) предполагает, что измерения, сделанные при более поздних замерах, проводятся в тех же местах, что и при более ранних. На практике этого очень трудно добиться.

Уравнение (4) предполагает, что существует связь между изменениями в средней толщине и скоростью, с которой происходит износ металла. Формула может быть справедливой для общего утонения, однако для локального износа оценки могут оказаться ошибочными.

Таким образом, актуальной остается задача получения «разумно консервативной» оценки скорости ЭКИ за счет учета факторов неопределенности, связанных с контролем толщин.

Для исследования такого рода неопределенности использованы данные эксплуатационного контроля, проведенного в разное время на АЭС «Дукованы-1», «Форсмарк-1» и других АЭС, а также необходимые данные из технической документации.

Замеры толщин стенок трубопровода питательной воды типоразмера 273×16 мм АЭС «Дукованы-1» были проведены в 1995 – 2002 гг. [2 – 4]. В таблице 1 приведены данные о количестве утонившихся, утолщившихся и не изменивших толщину стенки элементов трубопровода питательной воды по отношению к номинальной толщине на первом энергоблоке АЭС «Дукованы». Из этой таблицы следует, что в среднем количество замеров с утонением составило 48,8%, с утолщением – 50,9%, без изменения толщины – 0,3%. Общее количество замеров – 2902 шт.

В таблице 2 приведены значения минимальных $S_{мин}$ и максимальных толщин $S_{макс}$ длительность эксплуатации элементов до проведения контроля τ , скорости утонения $W_{утн}$ и утолщений $W_{утл}$, рассчитанные с использованием разностей между номинальными и минимальными толщинами и между максимальными и номинальными толщинами соответственно.

Кроме того приведены значения скоростей утонения $W_{утн}^p$, рассчитанные с помощью компьютерного кода *CHECWORKS*. Максимальное утонение по отношению к номинальной толщине равно 21%, максимальное утолщение – 31%, что превышает положительный допуск на толщину стенки трубопровода, равный 20%. Это свидетельствует о том, что отложения продуктов коррозии оказывают влияние на замеры толщин стенок при контроле. Скорости утонения, рассчитанные с использовани-

ем компьютерного кода *CHECWORKS*, превышают значения скоростей, рассчитанных по данным контроля, от 2,20 до 5,67 раз.

Таблица 1

Статистика изменений толщины стенки элементов трубопровода питательной воды на первом энергоблоке АЭС «Дукованы»

| Год замера | Наименование элемента | Утонилось | | Без изменения | | Утолщилось | | Сумма шт. |
|--------------------------|-----------------------|-----------|-------|---------------|------|------------|-------|-----------|
| | | шт. | % | шт. | % | шт. | % | |
| 1996 | Прямой участок | 36 | 60,0 | 0 | 0 | 24 | 40,0 | 60 |
| 1996 | Прямой участок | 16 | 66,7 | 0 | 0 | 8 | 33,3 | 24 |
| 1996 | Прямой участок | 28 | 46,7 | 0 | 0 | 32 | 53,3 | 60 |
| 1996 | Тройник | 38 | 69,0 | 0 | 0 | 17 | 31,0 | 55 |
| 1996 | Гиб 02 | 162 | 51,9 | 1 | 0,3 | 149 | 47,8 | 312 |
| 1996 | Гиб 06 | 172 | 46,2 | 0 | 0 | 200 | 53,8 | 372 |
| 2002 | Гиб 06 | 163 | 45,5 | 1 | 0,3 | 196 | 54,4 | 360 |
| 1995 | Гиб 16 | 197 | 50,0 | 1 | 0,3 | 196 | 49,7 | 394 |
| 1996 | Гиб 16 | 166 | 48,7 | 2 | 0,6 | 173 | 50,7 | 341 |
| 2000 | Гиб 16 | 172 | 51,2 | 1 | 0,3 | 163 | 48,5 | 336 |
| 2000 | Гиб 18 | 89 | 28,5 | 3 | 1,0 | 220 | 70,5 | 312 |
| 2001 | Гиб 30 | 177 | 64,1 | 1 | 0,4 | 98 | 35,5 | 276 |
| Сумма, среднее значение* | | 1416 | *48,8 | 10 | *0,3 | 1476 | *50,9 | 2902 |

Таблица 2

Значения утонений, утолщений, длительности эксплуатации, скоростей утонений, утолщений и относительных величин

| № гига | Дата замера | S _{мин} , мм | S _{макс} , мм | τ, лет | W _{упр} , мм/год | W _{унп} , мм/год | W _{упп} , мм/год | W _{упр} /W _{унп} | W _{упп} /W _{унп} | S _{мин} /S _{макс} | S _{макс} /S _{мин} | |
|-----------------|-------------|-----------------------|------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|
| | | | | | | | | | | | | |
| 02-К | 11.09.96 | 12,6 | 19,6 | 11,7 | 0,64 | 0,291 | 0,308 | 2,20 | 2,08 | 1,06 | 0,79 | 1,23 |
| 18-К | 14.09.96 | 13,7 | 20,5 | 11,7 | 0,64 | 0,197 | 0,385 | 3,25 | 1,66 | 1,95 | 0,86 | 1,28 |
| 30-К | 13.09.96 | 12,9 | 18,8 | 11,7 | 0,64 | 0,265 | 0,239 | 2,42 | 2,68 | 0,90 | 0,81 | 1,18 |
| 06-К | 18.09.96 | 13,0 | 20,9 | 11,7 | 0,80 | 0,256 | 0,419 | 3,13 | 1,91 | 1,64 | 0,81 | 1,31 |
| 06-К | 06.11.02 | 13,5 | 18,7 | 17,7 | 0,80 | 0,141 | 0,153 | 5,67 | 5,23 | 1,09 | 0,84 | 1,17 |
| 16-К | 11.09.95 | 13,8 | 19,9 | 10,7 | 0,65 | 0,206 | 0,364 | 3,16 | 1,79 | 1,77 | 0,86 | 1,24 |
| 16-К | 11.06.96 | 14,0 | 20,1 | 11,7 | 0,65 | 0,171 | 0,350 | 3,80 | 1,86 | 2,05 | 0,88 | 1,26 |
| Минимум | | 12,6 | 18,7 | 10,7 | 0,64 | 0,141 | 0,153 | 2,20 | 1,66 | 0,90 | 0,79 | 1,17 |
| Среднее | | 13,4 | 19,8 | 12,4 | 0,69 | 0,218 | 0,317 | 3,38 | 2,46 | 1,49 | 0,83 | 1,24 |
| Максимум | | 14,0 | 20,9 | 17,7 | 0,80 | 0,291 | 0,419 | 5,67 | 5,23 | 2,05 | 0,88 | 1,31 |

ВВЕДЕНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Анализ данных эксплуатационного контроля позволяет сделать вывод о том, что на погрешность расчетов скорости износа влияют такие факторы, как технологические допуски на толщины трубопроводов при их изготовлении и наличие отложений продуктов коррозии, толщина которых фиксируется с толщиной неповрежденного

металла. С учетом этих факторов уравнение (1) для расчета скорости износа трубопровода можно записать в виде

$$W_{\text{утн } 1} = [(S_{\text{ном}} \cdot K_{11} \cdot K_{12} - S_{\text{мин}} \cdot K_2)] / \Delta \tau_0, \quad (7)$$

где K_{11} – коэффициент, учитывающий положительный допуск на толщину стенки при изготовлении трубопровода; K_{12} – коэффициент, учитывающий вклад отложений продуктов коррозии в начальную расчетную толщину стенки; K_2 – коэффициент, учитывающий вклад отложений продуктов коррозии в значение минимальной толщины стенки.

Определение коэффициента K_{11} . Для определения этого коэффициента можно использовать технические условия ТУ 14-3-400-75, в которых указаны технологические допуски на изготовление трубопроводов. Значения допусков на толщины стенок трубопроводов в соответствии с ТУ приведены в табл. 3 [5].

Таблица 3
Допуски на толщины трубопроводов в соответствии с ТУ 14-3-400-75

| Виды труб | Предельные отклонения |
|---|-----------------------|
| Холодно- и теплodeформированные трубы | $\pm 10\%$ |
| Горячедеформированные наружные трубы из углеродистой и легированной стали диаметром до 108 мм | $-10\%, +15\%$ |
| Горячедеформированные трубы из углеродистой и легированной стали диаметром более 108 мм | $-5\%, +20\%$ |

В работе [6] сообщается, что при обмере более 6000 образцов прямых и изогнутых труб диаметром 44,5 – 82,5 мм с номинальной толщиной стенки от 3,43 до 8,64 мм, изготовленных из углеродистых или легированных сталей, было установлено, что толщина стенки распределяется по нормальному закону. Среднее значение толщины стенки прямых труб совпадает с серединой поля допусков. Толщина стенки изогнутых труб имеет нормальное распределение, среднее значение отклонения равно одной четвертой части ширины поля допусков. Минимальные толщины стенок изогнутых труб также имеют нормальное распределение.

Поле допусков для трубопроводов с внешним диаметром более 108 мм лежит в диапазоне от -5 до $+20\%$. Наиболее вероятный положительный допуск для таких трубопроводов составляет $+7,5\%$, и коэффициент K_{11} можно принять равным 1,075. Для трубопроводов с внешним диаметром до 108 мм наиболее вероятный положительный допуск составляет $+5,0\%$, и коэффициент K_{11} можно принять равным 1,025.

Определение коэффициентов K_{12} , K_{21} . Систематизированные данные о вкладе отложений продуктов коррозии в максимальную и минимальную толщину стенки трубопроводов отсутствуют. Из обработки замеров, проведенных на элементах в одних и тех же точках в разные периоды эксплуатации, следует, что значения нормализованных утонений и утолщений могут находиться в диапазоне $\pm 0,1$ по отношению к номиналу. Это позволяет сделать допущение, что в качестве минимального значения коэффициента K_{12} может быть принято значение 1,05, а минимального значения коэффициента K_{21} – 0,95.

С учетом рассмотренных значений коэффициентов K_{11} , K_{12} , K_{21} , $K_{\text{без}}$ уравнение (7) для расчета скорости износа запишется в виде

$$W_{\text{утн } 1} = [(S_{\text{ном}} \cdot 1,075 \cdot 1,05 - S_{\text{мин}} \cdot 0,95)] / \Delta \tau_0. \quad (8)$$

В отличие от уравнения (1) зависимость (8) частично снимает неопределенность, связанную с контролем толщин, оставаясь в рамках консервативной оценки.

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДА

Остаточный срок эксплуатации трубопровода до достижения минимально допустимой толщины с учетом зависимости (8) рассчитывается по уравнению

$$\Delta\tau_2 = (S_{\text{мин}} \cdot K_{21} - S_R) / (W_{\text{утн}} \cdot K_{\text{без}}). \quad (9)$$

Для определения минимально допустимых толщин стенок S_R на зарубежных АЭС используются расчетные коды *CASE N-480* и *CASE N-597-2* [10, 11]. Значение минимально допустимой толщины определяется в зависимости от размеров зоны повреждения. В соответствии с *CASE N-480* минимальная толщина в зоне локального утонения может составить $0,3S_{\text{ном}}$. В соответствии с *CASE N-597-2* минимальная толщина в зоне локального утонения может составить $0,1S_{\text{ном}}$. Ряд вопросов, связанных с определением минимально допустимых толщин, рассмотрен в работе [9].

Для отечественных АЭС для определения минимально допустимых толщин разработан руководящий документ РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010, введенный в действие в октябре 2012 г. Первая версия этого документа была введена в действие в 2006 г. [1].

Определение коэффициентов $K_{\text{без}}$. В работе [9] указано, что выбор соответствующего коэффициента безопасности является ответственностью владельца. При этом необходимо учитывать следующие правила.

- Минимальный коэффициент безопасности не должен быть менее 1,1.
- К случаям, когда коэффициент безопасности должен быть выше, относятся
 - * зоны, где прогнозная или изменяющаяся минимальная толщина стенки больше измеренной минимальной толщины стенки;
 - * линии или зоны, где замеры не проводились;
 - * некалиброванные линии;
 - * линии с неопределенными эксплуатационными условиями;
 - * линии, для которых известно, что в них имеются кольцевые подкладки;
 - * зоны, расположенные после диафрагм или регулирующей арматуры;
 - * зоны, в которых ухудшение ситуации может быть вызвано другими источниками, например, кавитацией или падением капель жидкости;
 - * линии и (или) зоны первого контура, расположенные в зоне большого расхода;
 - * линии, квалифицированные как важные для ядерной безопасности;
 - * линии или зоны первого контура, расположенные в непосредственной близости от оборудования, важного для безопасности;
 - * линии, имеющие проблемную историю либо аналогичные линиям с проблемной историей;
 - * линии с ограниченным количеством инспекционных данных, для которых измерения содержания хрома не проводились;
 - * линии, где эксплуатационные условия стали или станут более жесткими;
 - * использование сетки замеров толщин с размерами, большими, чем рекомендуемые в нормативной документации.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ИЗНОСА МЕТАЛЛА И ОСТАТОЧНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АЭС

Для расчетов скорости износа металла и расчета остаточного ресурса эксплуатации трубопроводов, подверженных коррозии, усиливаемой потоком, рекомендуется использовать уравнения (8) – (9).

Принятые допущения и ограничения при расчетах.

1. При наличии входного контроля в качестве начальной толщины допускается использовать толщины стенок по данным эксплуатационного контроля. При этом значе-

ние коэффициента $K_{11} = 1,0$, коэффициент K_{12} сохраняет принятое значение.

2. Скорость износа металла и остаточный ресурс эксплуатации трубопроводов для элементов с минимальными толщинами, превышающими номинал, т.е.

$$S_{\text{мин}} \geq S_{\text{ном}} \cdot K_{11} \cdot K_{12}, \quad (10)$$

не рассчитывается.

3. Расчеты утонения стенки, выполненные по данным контроля,

$$\Delta S_{\text{утн}} = (S_{\text{ном}} \cdot K_{11} \cdot K_{12} - S_{\text{мин}} \cdot K_2), \quad (11)$$

сопоставляются с расчетами значений утонений, определенных с помощью аттестованных программных средств (ПС).

4. Необходимость эксплуатационного контроля стенок с минимальными толщинами, превышающими номинал, определяется на основании прогнозных расчетов, проведенных с использованием аттестованных ПС.

Использование программных средств. Использование аттестованных программных средств позволяет рассчитывать скорость износа и значения утонений стенок трубопроводов с учетом факторов, определяющих интенсивность износа (режимных параметров, показателей ВХР, химического состава металла, конструктивных особенностей элементов, длительности эксплуатации трубопроводов).

Прогнозные расчеты оценивают возможный износ металла до проведения эксплуатационного контроля толщин стенок и позволяют существенно снизить объемы и финансовые затраты на эксплуатационный контроль.

АНАЛИЗ ДАННЫХ КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

В таблицах 4, 5 представлены результаты расчетов по данным толщинометрии на одном из блоков АЭС с ВВЭР для гибов (табл. 4) и прямых участков (табл. 5) трубопроводов питательной воды. Срок эксплуатации – 27 лет. Расчетные коэффициенты приняты следующими: $K_{11}=1,075$, $K_{12}=1,1$, $K_{21}=0,95$, $K_{\text{без}}=1,1$.

Рассмотрены 31 гиб и 10 прямых участков типоразмера 530×28 мм и четыре гига и семь прямых участков типоразмера 426×24 мм – всего 35 гибов и 17 прямых участков.

В таблицах представлены следующие параметры: номинальная $S_{\text{ном}}$ и минимальная $S_{\text{мин}}$ толщины стенки элемента, скорости ЭКИ, рассчитанные без учета поправочных коэффициентов $W_{\text{эки1}}$ и с их учетом – $W_{\text{эки2}}$, остаточный ресурс τ_1 и, соответственно, τ_2 .

Введение коэффициентов, учитывающих технологические допуски на изготовление и влияние отложений на номинальную и минимальную толщины стенки трубопроводов, приводит к увеличению оценки скорости ЭКИ и, соответственно, уменьшению оценки остаточного ресурса примерно в 2,2 раза для гибов и в 3,14 раза для прямых участков трубопроводов питательной воды типоразмеров 530×28 мм и 426×24 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа повторных замеров на чешской АЭС «Дукованы-1» отмечается тенденция увеличения минимальных толщин при последующих замерах и, соответственно, увеличение остаточного ресурса. Увеличение толщин по отношению к номинальной может достигать 30%. Этот фактор необходимо учитывать при разработке методики расчета скорости ЭКИ металла.

2. Предлагается расчетная зависимость для определения скорости ЭКИ металла, включающая в себя корректирующие коэффициенты, учитывающие влияние техно-

логических допусков на толщину при изготовлении трубопроводов, а также влияние отложений продуктов коррозии на значения начальных и минимальных толщин.

3. Показано, что расчет по разработанной методике элементов трубопроводов питательной воды типоразмеров 530×28 мм и 426×24 мм одного из блоков АЭС с ВВЭР приводит к увеличению оценки скорости ЭКИ и, соответственно, уменьшению оценки остаточного ресурса примерно в 2,2 раза для гибов и в 3,14 раза для прямых участков.

4. Консервативная оценка остаточного ресурса оставляет достаточно времени для проведения повторных замеров на проблемных элементах и принятия решения о замене.

Таблица 4

Оценка показателей ЭКИ гибов трубопроводов питательной воды

| Элемент | S _{ном.} мм | S _{мин.} мм | S _{доп.} мм | W _{эки1} мм/год | τ ₁ год | W _{эки2} мм/год | τ ₂ год |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Гиб СС 8-7з | 28 | 22 | 19,5 | 0,26 | 9,6 | 0,584 | 4,2 |
| Гиб СС 32з-31 | 28 | 22,4 | 19,5 | 0,243 | 11,9 | 0,566 | 5,1 |
| Гиб СС 5-4 | 28 | 21,9 | 19,5 | 0,264 | 9,1 | 0,589 | 4,1 |
| Гиб СС 6з-5 | 28 | 22,2 | 19,5 | 0,252 | 10,8 | 0,575 | 4,7 |
| Гиб СС 38-37 | 28 | 21,1 | 19,5 | 0,256 | 6,3 | 0,625 | 2,6 |
| Гиб СС 11з-11 | 28 | 21,9 | 19,5 | 0,265 | 9,1 | 0,589 | 4,0 |
| Гиб СС 11з-11 | 28 | 22 | 19,5 | 0,26 | 9,6 | 0,584 | 4,2 |
| Гиб СС 32з-31 | 28 | 22,5 | 19,5 | 0,239 | 12,5 | 0,561 | 5,3 |
| Гиб СС 32з-31 | 28 | 23,3 | 18,7 | 0,204 | 22,5 | 0,525 | 8,7 |
| Гиб СС 7-6 | 28 | 19,6 | 19,5 | 0,365 | 0,8 | 0,693 | 0,4 |
| Гиб СС 15-15з | 28 | 19,8 | 19,5 | 0,356 | 1,61 | 0,683 | 0,84 |
| Гиб СС 11-10 | 28 | 20 | 19,5 | 0,347 | 1,44 | 0,538 | 0,92 |
| Гиб СС 31-30 | 28 | 26 | 19,5 | 0,086 | 75,5 | 0,342 | 19,0 |
| Гиб СС 31з-33 | 28 | 24,2 | 19,5 | 0,165 | 28,4 | 0,412 | 11,4 |
| Гиб СС 68з-64 | 28 | 24,1 | 19,5 | 0,169 | 27,2 | 0,416 | 11,0 |
| Гиб СС 63з-62 | 28 | 24,1 | 19,5 | 0,169 | 27,2 | 0,416 | 11,0 |
| Гиб СС 56-57 | 28 | 24,4 | 19,5 | 0,156 | 28,8 | 0,404 | 11,1 |
| Гиб СС 64з-63 | 28 | 24,2 | 19,5 | 0,165 | 28,4 | 0,412 | 11,4 |
| Гиб СС 57-58 | 28 | 24,1 | 19,5 | 0,169 | 27,2 | 0,416 | 11,0 |
| Гиб СС 63-63з | 28 | 24,2 | 19,5 | 0,165 | 28,4 | 0,412 | 11,4 |
| Гиб 76-76з | 28 | 22,1 | 19,5 | 0,256 | 10,1 | 0,497 | 5,2 |
| Гиб 20-19 | 28 | 22,8 | 19,5 | 0,226 | 14,6 | 0,466 | 7,08 |
| Гиб 33-32 | 28 | 22,7 | 19,5 | 0,230 | 14,0 | 0,470 | 6,8 |
| Гиб 70а-70 | 28 | 22,1 | 19,5 | 0,256 | 10,1 | 0,497 | 5,2 |
| Гиб 73-73з | 28 | 21,2 | 19,5 | 0,295 | 5,76 | 0,528 | 3,2 |
| Гиб 83-84 | 28 | 21,5 | 19,5 | 0,282 | 7,1 | 0,516 | 3,8 |
| Гиб 71-72 | 28 | 21,4 | 19,5 | 0,286 | 6,64 | 0,520 | 3,6 |
| Гиб 33а-33 | 28 | 21 | 19,5 | 0,304 | 4,93 | 0,536 | 2,8 |
| Гиб 61з-62 | 28 | 20,9 | 19,5 | 0,308 | 4,54 | 0,540 | 2,6 |
| Гиб 26з-26 | 28 | 21,6 | 19,5 | 0,278 | 7,55 | 0,513 | 4,1 |
| Гиб 42з-41 | 28 | 21 | 19,5 | 0,304 | 4,93 | 0,536 | 2,8 |

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Таблица 5

Оценка показателей ЭКИ прямых участков трубопроводов питательной воды

| Элемент | S _{ном} , мм | S _{мин} , мм | S _{доп} , мм | W _{эки1} , мм/год | τ ₁ , год | W _{эки2} , мм/год | τ ₂ , год |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| 530×28 мм | | | | | | | |
| ПУ* за СС 6 | 28 | 22,9 | 19,5 | 0,201 | 16,9 | 0,543 | 6,2 |
| ПУ | 28 | 19,6 | 19,5 | 0,365 | 0,3 | 0,693 | 0,14 |
| ПУ | 28 | 20 | 19,5 | 0,352 | 1,4 | 0,675 | 0,72 |
| ПУ за гибом 31-30 | 28 | 24 | 19,5 | 0,173 | 26,0 | 0,418 | 10,7 |
| ПУ | 28 | 23,3 | 19,5 | 0,204 | 18,6 | 0,447 | 8,5 |
| ПУ | 28 | 24,1 | 19,5 | 0,169 | 27,2 | 0,416 | 10,8 |
| ПУ | 28 | 24,1 | 19,5 | 0,169 | 27,2 | 0,416 | 10,8 |
| ПУ за гибом | 28 | 26,3 | 19,5 | 0,073 | 93,1 | 0,331 | 20,6 |
| ПУ за гибом | 28 | 21,9 | 19,5 | 0,265 | 9,05 | 0,501 | 4,7 |
| ПУ за гибом | 28 | 27,2 | 19,5 | 0,034 | 226 | 0,296 | 25,9 |
| 426×24 мм | | | | | | | |
| ПУ | 24 | 21,1 | 18,6 | 0,126 | 19,0 | 0,339 | 7,0 |
| ПУ | 24 | 21,3 | 18,6 | 0,117 | 22,2 | 0,332 | 7,8 |
| ПУ | 24 | 21,5 | 18,6 | 0,108 | 25,9 | 0,324 | 8,6 |
| ПУ | 24 | 21,1 | 18,6 | 0,126 | 19,0 | 0,339 | 7,0 |
| ПУ | 24 | 21,5 | 18,6 | 0,108 | 25,9 | 0,324 | 8,6 |
| ПУ за СС 59 | 24 | 22,8 | 18,6 | 0,052 | 80,8 | 0,273 | 15,3 |
| ПУ за СС 64 | 24 | 21,1 | 18,6 | 0,126 | 19,8 | 0,339 | 7,3 |

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Литература

- РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010 «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе». - М.: ВНИИАЭС. - 2012, 104 с.
- Sweden country presentation IAEA FAC RCM 2. On the risk of using grid measurements when close to allowable minimum wall thickness. Germany, Erlangen, 2014.06.05.
- Ruscak M., Splichal K., Kaplan J. The complex approach to the flow accelerated corrosion in Czech nuclear power plants / Proceed. of specialists meeting organized by the Inter. Atomic Energy Agency. 19-22 Sept. 1994, IAEA Vienna held in Kiev. – Ukraina, 1994. – PP. 215-228.
- Ruscak M., Kaplan J., Kadec ka 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.
- Русжак М. Решение проблематики эрозионной коррозии трубопроводов второго контура атомных электростанций. // Институт ядерных исследований. – Чешская республика, Ржеж, 1995. – 16 с.
- Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R1). 1301-01. Nov. 1996. 59 p.
- Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R2). 1011838. Apr. 1999. 90 p.
- Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R3).

1011838. May 2006. 92 p.

9. Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4) / 3002000563. Technical Report, November 2013. 94 p.

10. Case of ASME. Boiler and Pressure Vessel Code. CASE N-480. May 10, 1990. PP. 787-795.

11. Case of ASME Requirments for Analilycal Evaluation of Pipe Wall Thinning. Section XI, Devision 1. Case N-597-2. November 10, 2003. 13 p.

Поступила в редакцию 20.11.2015 г.

Авторы

Бараненко Валерий Иванович, профессор, доктор техн. наук
E-mail: baranenko@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

Мурзина Ольга Эдуардовна, инженер

UDC 621.311.25:621.039.620.193.1

SUBSTANTIATION OF FAC RATE AND SERVICE LIFE ESTIMATION UNDER OPERATION CONTROL DATA

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

* All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation («VNIIAES JSC»). 25 Ferganskaya st., Moscow, 109507 Russian
Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI». 1 Studgorook, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

The paper deals with development of procedure of FAC rate estimation. Flow-accelerated corrosion – complex mechanism of NPP equipment elements damage. Its rate depends on such factors as metal corrosion, stream hydrodynamic, equipment elements geometry (straight parts of piping, welding area, bending and etc.), operating conditions, operation time, metal composition, thickness of corrosion product deposits and others. Decrease of element wall thickness is due to metal corrosion, increase of element wall thickness is due to corrosion product deposits. Arising of accuracy of service life prediction it is necessary to reduce uncertainties connected with control means and data quality. At present trust in procedure of FAC rate estimation is absent. Estimation of residual service life for NPP equipment elements also needs in above-mentioned procedure.

Development of FAC rate estimation procedure is based on analysis of control data. There are calculating main indexes of FAC such as numbers of both increasing wall thickness and decreasing one, rate of wall thickness decreasing and rate of corrosion product depositing.

Wall thickness decreasing due to FAC is accompanied by corrosion product depositing on the inner surface of piping. Due to this process the calculated residual service life formally is increasing. However, real wall thickness under corrosion product deposit is unknown as well as initial wall thickness.

To correspond to the facts, the new procedure of FAC rate estimation must be well-grounded. Research performed leads to original procedure taking into account

tolerance of manufacturing on piping wall thickness and corrosion product deposit influence on both initial and minimal measured wall thickness (in all, three coefficients). To estimate the residual service life new index – safe coefficient - is using. This coefficient is recommended by international practice of NPP operation. Additional coefficients allow increasing of FAC rate calculation conservatism about 2,5 times in comparison with FAC rate calculation based on nominal wall thickness.

Key words: flow-accelerated corrosion, corrosion products deposit, wall thickness control data, procedure of flow-accelerated corrosion rate estimation, residual service life, minimal admissible wall thickness.

REFERENCES

1. RD EO 1.1.2.11.0571-2010 «Normy dopuskaemyh tolschin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistyh stalej pri erozionno-korrosionnom iznose» [Norms of admissible wall thickness for carbon steel piping under flow accelerated corrosion]. Moscow. VNIIAES Publ. 2012, 104 p. (in Russian).
2. Sweden country presentation IAEA FACRCM 2. On the risk of using grid measurements when close to allowable minimum wall thickness. *Erlangen*, 2014.06.05.
3. Ruszhak M., Shplichal K., Kaplan J. The complex approach to the flow accelerated corrosion in Czech nuclear power plants. *Proceed. of specialists meeting organized by the Inter. Atomic Energy Agency*. 19-22 Sept, 1994, IAEA Vienna held in Kiev, Ukraina. 1994, pp. 215-228.
4. Ruszhak M., Kaplan J., Kadechka 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.
5. Ruszhak M. *Reshenie problematiki erozionnoy korrozii truboprovodov vtorogo kontura atomnyh elektrostanciy* [Piping Erosion-Corrosion at the second outline of NPP] Institut yadernyh issledovaniy. Cheshskaya respublika, Rzshezh. 1995, 16 p.
6. Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R1). 1301-01. Nov. 1996. 59 p.
7. Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program, EPRI, Palo Alto, CA: 1999. NSAC-202L-R2.
8. Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R3). 1011838. May 2006. 92 p.
9. Recommendation for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4) / 3002000563. Technical Report, Nov. 2013. 94 p.
10. Case of ASME. Boiler and Pressure Vessel Code. CASEN-480. May 10, 1990, pp. 787-795.
11. Case of ASME. Requirments for Analiyical Evaluation of Pipe Wall Thinning. Section XI, Devision 1. CASEN-597-2. November 10, 2003. 13 p.

Authors

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

E-mail: baranenko@vniiaes.ru

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

E-mail: olga@iate.obninsk.ru

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

E-mail: salnikov@iate.obninsk.ru

Murzina Ol'ga Eduardovna, Engineer