

УДК 639.039

## УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС В УСЛОВИЯХ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тыггарев Ю.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Герасимова А.Г.

Безопасность, надежность и экономичность эксплуатации АЭС в значительной степени зависят от надежного функционирования оборудования 2-ого контура, в том числе теплообменного оборудования и трубопроводов конденсатно-питательного тракта (КПТ). Технологические системы конденсатно-питательного тракта АЭС имеют значительную протяженность, сложную конфигурацию и работают в условиях, при которых основным видом дефектов металла трубопроводов и теплообменного оборудования, изготовленных из углеродистой стали, является эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ). ЭКИ происходит при определенных условиях, зависящих от большого количества факторов, и имеет место на энергоблоках как тепловой, так и атомной энергетики. Проблема ЭКИ сформирована как проблема в декабре 1986 г. после серьезной аварии по причине ЭКИ на АЭС США Сарри-2. До этого события фиксировались многочисленные случаи повреждений трубопроводов АЭС, но эксплуатационный контроль толщин стенок труб не регламентировался, и нормативная документация по ЭКИ не разрабатывалась.

ЭКИ можно рассматривать как процесс локального утонения стенки элемента оборудования или трубопровода в зонах с повышенной турбулентностью однофазного или двухфазного потока коррозионно-активной среды.

ЭКИ является общей причиной повреждений элементов оборудования и трубопроводов наряду с коррозионным растрескиванием циркуляционных трубопроводов кипящих реакторов и ПГ двухконтурных АЭС. В последние годы темпы повреждений по причине ЭКИ снижаются, но остаются высокими.

Проведенный системный анализ выявил особенности развития процесса ЭКИ на различных типах реакторных установок и на различных энергоблоках, а также особенности контроля, представления и хранения результатов. Это позволяет корректно анализировать данные замеров, адекватно прогнозировать развитие процесса ЭКИ и, следовательно, снизить вероятность повреждений по этой причине на энергоблоках атомной и тепловой энергетики при эксплуатации оборудования и трубопроводов, изготовленных из углеродистых сталей.

По мере увеличения срока эксплуатации энергоблоков перечень элементов оборудования и трубопроводов, на которых необходимо контролировать степень износа металла, увеличивается. Поэтому актуальной становится проблема оптимизации объемов и периодичности контроля.

Для решения широкого комплекса вопросов, связанных с эрозионно-коррозионным износом элементов оборудования и трубопроводов, в отрасли разработаны специальные программы. Для установления допустимых значений повреждений металла разрабатывается регулирующая документация, которая предполагает широкое использование компьютерных расчетов, разработку норм допустимых толщин стенок трубопроводов и оборудования, подверженных ЭКИ, разработку методик определения химического состава металла и другой документации. Основной подход при разработке регулирующей документации не противоречит принятой в мировой практике методологии, в том числе тому, что любые прогнозные результаты не должны противоречить данным эксплуатационного контроля. В связи с этим возникает ряд задач:

- 1) оценка скорости ЭКИ по данным замеров толщины стенки;
- 2) оценка остаточного ресурса;

3) получение информации для прогнозных расчетов с учетом качества материалов, используемых для изготовления элементов трубопроводов.

Управление ресурсом оборудования АЭС в условиях ЭКИ – система мероприятий, включающая разработку соответствующих методик оценки и прогнозирования ресурса, направленная на увеличение срока службы установленного оборудования, обеспечение своевременного и качественного контроля и недопущение инцидентов по причине ЭКИ.

Описание методики. Работы по изучению закономерностей эрозионно-коррозионного износа на АЭС советского (после распада СССР – российского) производства проводятся в течение длительного периода. В итоге разработаны типовые программы контроля состояния основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов атомных электростанций с реакторными установками типа ВВЭР-1000, ВВЭР-440, РБМК-1000, БН-600 в соответствии с правилами устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-008-89. Типовые программы определяют общие требования и не охватывают полностью перечень элементов оборудования и трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу.

В 2002 г. был подготовлен верификационный отчет и аттестовано программное средство ЭКИ-02, предназначенное для расчета скорости ЭКИ и величины утонения стенок трубопроводов с однофазной средой на АЭС с ВВЭР-440, в 2005 г. - ЭКИ-03, предназначенное для расчета скорости ЭКИ и величины утонения стенок трубопроводов с двухфазной средой. Эти программы позволяют рассчитывать значения следующих величин [1]:

- скорости ЭКИ в начальный и конечный моменты эксплуатации трубопровода;
- средней скорости ЭКИ за расчетный временной интервал;
- утонение стенки трубопровода за расчетный временной интервал.

В настоящее время эти программные средства позволяют проводить вариационные расчеты для оценки подверженности тех или иных элементов трубопроводов, входящих в определенные подсистемы, эрозионно-коррозионному износу. На рис. 1 приведен интерфейс программы ЭКИ-02.0.2.

Для установления допустимых значений повреждений металла разрабатывается регулирующая документация, которая предполагает широкое использование компьютерных расчетов, разработку норм допустимых толщин стенок трубопроводов и оборудования, подверженных ЭКИ, разработку методик определения химического состава металла, оценки скорости ЭКИ по данным контроля и другой документации [1].

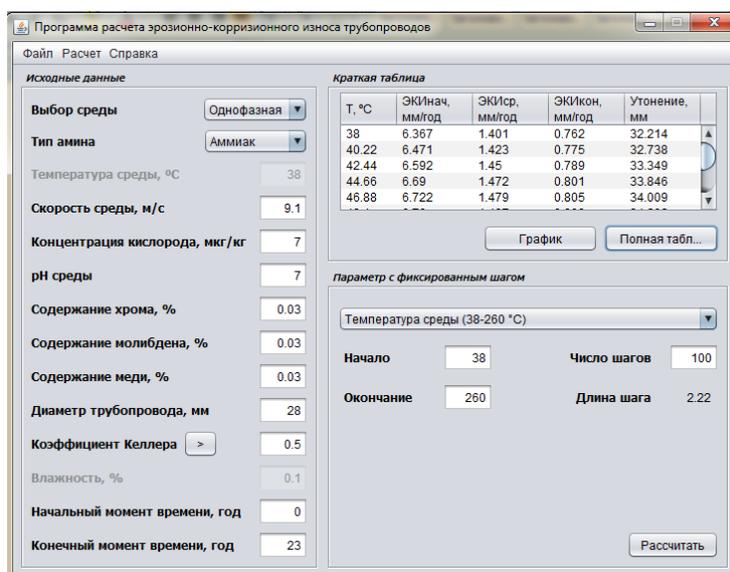


Рисунок 1. Интерфейс программного средства ЭКИ-02.02

В мировой практике существует два основных направления прогнозирования ЭКИ: на основе модели Чексала-Гурвица и на основе теоретической гидродинамической модели - BRT-CICERO<sup>TM</sup> Боучакорта. В России разработано ПС на основе модели Чексала-Гурвица. Цель ПС ЭКИ-02.01 – расчет скорости ЭКИ трубопроводов АЭС, выполненных из перлитных сталей. Скорость ЭКИ определяется с помощью эмпирических корреляций, полученных на основе обработки результатов лабораторных исследований эрозионно-коррозионного износа металла трубопроводов в однофазных средах, анализа данных эксплуатационного контроля и в соответствии с имеющимися в литературных источниках рекомендациями. Диапазоны изменения параметров выбраны из соображений, определяемых условиями эксплуатации АЭС с ВВЭР и РБМК и АЭС других типов. Вывод эмпирических зависимостей для определения значений параметров в ПС проведен таким образом, чтобы расчетное значение скорости ЭКИ распределялись равномерно как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения [1].

Расчет скорости ЭКИ с помощью программных средств проводится по уравнению, предложенному Чексалом [1]:

$$W_{эки} = C_0 \times F_1(T) \times F_2(XC) \times F_3(W_{воды}) \times F_4(O_2) \times F_5(pH) \times F_6(K) \times F_7(\alpha) \times F_8(A) \times F_9(\tau) \quad (1)$$

где  $W_{эки}$  – скорость коррозии, мм/год;  $C_0$  – коэффициент, равный 1 мм/год;

$F_1(T)$  – коэффициент, учитывающий температуру;

$F_2(XC)$  – коэффициент, учитывающий состав металла;

$F_3(W_{воды})$  – коэффициент, определяемый скоростью среды;

$F_4(O_2)$  – коэффициент, учитывающий концентрацию кислорода;

$F_5(pH)$  – коэффициент, учитывающий значение pH;

$F_6(K)$  – коэффициент, учитывающий геометрию трубопровода (учитывается значением коэффициента 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);

$F_9(\tau)$  – коэффициент, учитывающий длительность эксплуатации элемента.

Взаимосвязь между коэффициентами  $F_1$ - $F_9$  устанавливается эмпирически. При этом предполагается соблюдение следующих принципов:

- все параметры, входящие в зависимость (1), объединяются в общую модель;
- для обоснования модели используются все имеющиеся в наличии данные;
- модель является эмпирической, однако формируется на основе физического обоснования.

В таблице 1 представлены пределы значений параметров в ПС ЭКИ-02 [1].

Таблица 1 – Допустимые значения параметров модели Чексала

Наименование параметра	Размерность	Диапазон	
		от	до
Температура среды	°С	38	260
Концентрация кислорода	мкг/дм <sup>3</sup>	0	500
Значение pH	ед. pH	7	10,2
Концентрация в металле хрома	%	0,03	2
Концентрация в металле меди	%	0,03	0,5
Концентрация в металле молибдена	%	0,03	0,57
Скорость среды	м/с	0,002	38
Значение коэффициента Келлера		0,04	1
Влажность пара	%	0,1	15
Время эксплуатации блока	Лет	0	50

Для вновь вводимых блоков значения калибровочных коэффициентов, используемых в расчетах с использованием программных средств, могут иметь несколько иные значения, чем для ранее введенных в эксплуатацию блоков. Это объясняется различными водно-

химическими режимами на этих блоках, особенно в первые годы их эксплуатации. На результат расчета могут влиять и другие факторы, которые необходимо учитывать при использовании разработанных ПС для вновь строящихся блоков.

**Расчет скорости ЭКИ и остаточного ресурса для трубопроводов Кольской АЭС.** Станция состоит из четырех энергоблоков, с реакторами типа ВВЭР-440 и турбинами К-220-44-3 Харьковского Турбинного Завода. Данные об энергоблоках Кольской АЭС приведены в таблице 2. [2]

Таблица 2 – Действующие энергоблоки Кольской АЭС

Номер энергоблока	Тип реактора	Установленная мощность, МВт	Дата пуска
1	ВВЭР-440 (РУ В-230)	440	29.06.1973 г.
2	ВВЭР-440 (РУ В-230)	440	08.12.1974 г.
3	ВВЭР-440 (РУ В-213)	440	24.03.1983 г.
4	ВВЭР-440 (РУ В-213)	440	11.10.1984 г.
Суммарная установленная мощность 1760 МВт			

В таблице 3 приведены результаты расчетов скорости ЭКИ и остаточного ресурса трубопроводов Кольской АЭС блока №2. Проанализированы данные по трубопроводу основного конденсата ТГ-3, а также паропроводы первой ступени ТГ-3. Рассчитано 19 элементов трубопроводов: из них 9 гибов и 10 прямых участков. Расчеты выполнены при следующих исходных данных: при содержании кислорода 10 мкг/кг и рН, равном 9; содержание каждого из легирующих элементов (Cr, Mo и Cu) в материале трубопровода равно 0,03 %,  $\tau$  равно 34 года; коэффициент Келлера для прямого участка равен 0,04, длягиба – 0,3; амин – этаноламин.

Таблица 3 – Расчет скорости и остаточного ресурса трубопроводов Кольской АЭС с помощью ПС ЭКИ-02.02

Код узла	Типоразмер	$S_{\text{мин}}$ , мм	$W_{\text{ЭКИ нач.}}$ , мм/год	$W_{\text{ЭКИ ср.}}$ , мм/год	$W_{\text{ЭКИ кон.}}$ , мм/год	Утонение, мм
Гибы						
328Г-328Б	273x10,0	8,8	0,565	0,076	0,043	1,973
304-306	219x9	7,0	0,356	0,074	0,042	1,927
343-344	273x10,0	9,4	0,558	0,073	0,041	1,969
40Г-40Е	426x14,0	14,0	0,387	0,081	0,045	2,096
341Б-342	273x10,0	8,1	0,381	0,079	0,045	2,064
40Д-332	426x14,0	11,7	0,405	0,084	0,047	2,19
300-301	108x4,0	3,8	0,345	0,072	0,04	1,868
55-55А	219x9,0	6,8	0,372	0,077	0,043	2,014
66А-66	325x9,0	10,0	0,39	0,081	0,045	2,109
Прямые участки за гибом						
328Г-328Б	0273x10,0	11,0	0,051	0,011	0,006	0,275
304-306	0219x9,0	7,3	0,05	0,01	0,006	0,259
40Г-40Д	426x14,0	15,0	0,054	0,011	0,006	0,292
53В-53А	273x10,0	10,4	0,051	0,011	0,006	0,275
54В-52	219x9,0	9,2	0,05	0,01	0,006	0,259
300-301	108x4,0	4,5	0,046	0,01	0,005	0,249
55-55А	219x9,0	8,8	0,05	0,01	0,006	0,259
19-20	426x14,0	14,7	0,053	0,011	0,006	0,291
65А-65Е	426x14,0	14,4	0,054	0,011	0,006	0,292
66Б-67	325x9,0	11,4	0,052	0,011	0,006	0,281

По результатам расчета скорости ЭКИ, представленной в таблице 3 видно, что наибольшую скорость ЭКИ имеет в первоначальный период эксплуатации трубопроводов. При последующей эксплуатации скорость ЭКИ снижается.

Наибольшее влияние на скорость ЭКИ оказывает температура среды. В таблице 4 и на рисунке 2 приведена зависимость ЭКИ от температуры при этаноламиновом ВХР по данным расчета с помощью ПС ЭКИ-02. Расчеты выполнены для прямого участка конденсатопровода системы основного конденсата типоразмера 325×9 мм при следующих исходных данных: скорость среды – 3,2 м/с, концентрация кислорода – 7 мкг/кг, рН среды = 9.

Таблица 4 – Зависимость скорости ЭКИ и величины утонения от температуры при этаноламиновом ВХР

№	T, °C	W <sub>ЭКИ нач.</sub> мм/год	W <sub>ЭКИ ср</sub> мм/год	W <sub>ЭКИ кон.</sub> мм/год	Утонение, мм
1	38	0,263	0,055	0,031	1,423
2	48,8	0,278	0,058	0,033	1,507
3	59,6	0,298	0,062	0,035	1,614
4	70,4	0,343	0,071	0,04	1,856
5	81,2	0,406	0,085	0,047	2,2
6	92	0,485	0,101	0,057	2,623
7	102,8	0,578	0,12	0,067	3,127
8	113,6	0,677	0,141	0,079	3,663
9	124,4	0,774	0,161	0,09	4,19
10	135,2	0,865	0,18	0,101	4,682
11	156,8	0,864	0,18	0,101	4,677
12	167,6	0,742	0,154	0,087	4,016
13	189,2	0,418	0,087	0,049	2,261
14	200	0,285	0,059	0,033	1,542

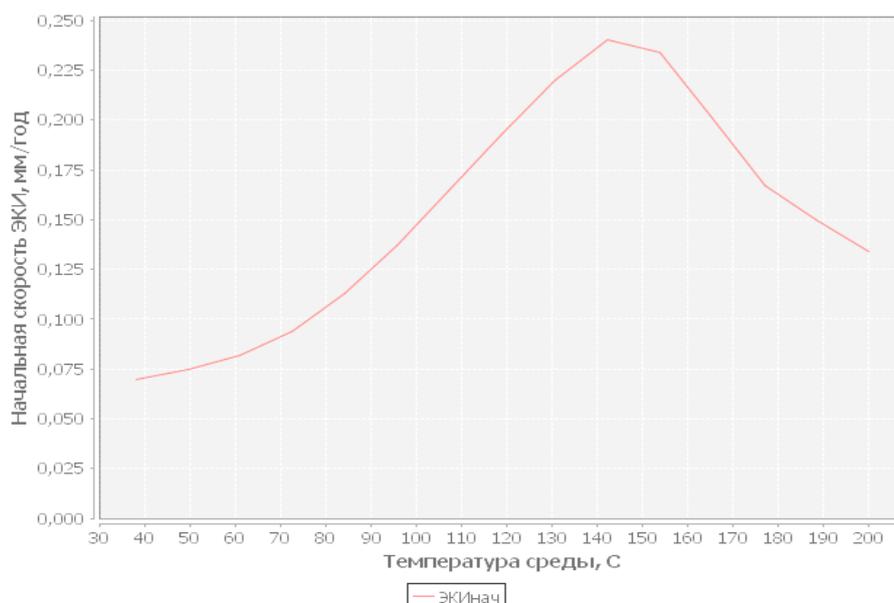


Рисунок 2. Зависимость скорости ЭКИ от температуры

Проанализировав данные таблицы 4 и рисунок 2 можно сделать вывод, что наиболее интенсивный эрозионно-коррозионный износ идет при температурах от 110°C до 170°C. Работа теплоэнергетического оборудования в этих температурных диапазонах не благоприятна и сопровождается уменьшением срока службы конструкционных материалов.

На элементы, работающие в данном температурном интервале, следует обращать повышенное внимание.

При температурах до 110°C и свыше 170°C скорость ЭКИ замедляется. Так как большая часть оборудования АЭС работает при температурах выше 170°C, то их долговечность в этом плане обеспечивается.

Анализ результатов. По результатам расчетов скорости ЭКИ и остаточного ресурса трубопроводов на Кольской АЭС с помощью ПС ЭКИ-02 были обнаружены элементы с высокой скоростью ЭКИ, а также элементы с допустимой скоростью ЭКИ. Среди 19 элементов 9 элементов имеют скорость ЭКИ более 0,040 мм/год. Наиболее подверженными эрозионно-коррозионному износу следует считать гибы типоразмера 426x14 мм: максимальная скорость ЭКИ равна 0,084 мм/год - более чем в два раза превышает нормируемое значение 0,04 мм/год. Максимальная величина утонения составляет 16% от номинальной толщины.

Введем категории трубопроводов с точки зрения необходимости регулярного контроля. *Первая категория* включает в себя элементы с максимальным износом, требующие контроля в течение эксплуатации (т.е. с износом выше 20% от номинальной толщины стенки), *вторая категория* включает элементы с износом средней степени, период контроля для которых существенно больше (т.е. износ порядка 10-20%), к *третьей категории* следует отнести элементы, для которых либо совсем не наблюдается износ, либо максимальная скорость износа не превышает нормируемую - 0,04 мм/год.

На рисунке 3 приведена диаграмма, показывающая относительное количество элементов с различной степенью износа.

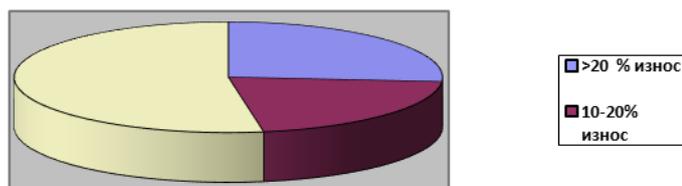


Рисунок 3. Относительное число элементов трубопроводов с различной степенью износа

Из рисунка видно, что к первой категории трубопроводов (имеют утонение более 20%) относятся 26% проконтролированных отводов, ко второй – 21%, остальные элементы не требуют регулярного контроля.

#### Литература

1. Гулина О.М., Бараненко В.И. Методология оценки ресурсных характеристик трубопроводов и оборудования АЭС в условиях ЭКИ. Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 2012. – 45с.
2. Данные по Кольской АЭС с сайта ОАО «Концерн Росэнергоатом». <http://www.kolanpp.rosenergoatom.ru>