

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА ДОПУСКАЕМЫХ ТОЛЩИН СТЕНОК ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС В УСЛОВИЯХ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА

А.В. Щербаков, О.М. Гулина, Н.Л. Сальников

Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ. 249040, Обнинск, Студгородок, 1



Разработан программный комплекс по расчету допустимых толщин элементов трубопроводов, изготовленных из углеродистых сталей и работающих в условиях эрозионно-коррозионного износа, соответствующего отраслевому регламенту РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010. Основные принципы – обеспечение достоверности и сохранение консервативности расчетов, базирование на нормативах отрасли, расчете характеристического размера дефекта для данного элемента трубопровода и анализе действующих напряжений. Для работы алгоритма разработана база данных со значениями физико-химических свойств металлов, что позволило производить расчеты всех возможных типоразмеров элементов при реальных условиях эксплуатации. В базе данных представлены все используемые на АЭС марки стали и их физико-химические свойства. Реализована возможность расширения перечня металлов и их свойств. На сегодня методики расчета реализованы для прямого участка, гибов и крутоизогнутых гибов, а также зон околошовных соединений. Вывод результатов полностью соответствует форме РД. Тестирование программного комплекса, проведенное более чем на пятидесяти элементах из РД, показало совпадение рассчитанных параметров со значениями, приведенными в РД, с точностью до 3%. Главной особенностью разработки является реализованная возможность расчетов для свободных типоразмеров элементов и произвольных допустимых по регламенту условий.

Ключевые слова: эрозионно-коррозионный износ, толщина стенки трубопровода, программа, давление, прочность, ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание надежной работы оборудования АЭС является важной задачей не только на стадии проектирования и строительства, но и на стадии эксплуатации. Именно процесс эксплуатации является определяющим в вопросе, как долго и успешно будет функционировать АЭС в целом.

Трубопроводные системы второго контура реакторов изготовлены, в основном, из углеродистых сталей с достаточно низким содержанием хрома и меди, что стимулирует развитие процесса эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ). ЭКИ связан с размывами внутренней поверхности элементов трубопроводов, особенно в условиях высокой турбулентности потока, что может привести к недопустимым утонениям и даже разрывам

© А.В. Щербаков, О.М. Гулина, Н.Л. Сальников, 2014

(«разрушение перед течью»). Оценка остаточного ресурса элемента, или времени до достижения минимально допустимой толщины, основана на расчете скорости ЭКИ по данным эксплуатации на основе прогнозных методик (например, CHECKWORKS, DASY, COMSY и др. зарубежных кодов, а также ЭКИ-02 и ЭКИ-03), либо на базе данных эксплуатационного контроля толщин стенок элементов оборудования и трубопроводов [1].

Формула для оценки остаточного ресурса

$$\tau_{\text{ост}} = (S_{\text{min}} - S_{\text{доп}}) / W_{\text{ЭКИ}},$$

$$W_{\text{ЭКИ}} = (S_{\text{ном}} - S_{\text{min}}) / \tau,$$

где $\tau_{\text{ост}}$ – остаточная длительность эксплуатации, лет; $W_{\text{ЭКИ}}$ – скорость ЭКИ, мм/г.; τ – длительность эксплуатации, лет; $S_{\text{ном}}$ – исходная (номинальная) толщина стенки элемента, мм; $S_{\text{доп}}$ – минимально допустимая толщина стенки элемента, мм. Однако для определения того, какие именно значения следует подставлять в данные формулы, потребовались специальные исследования на различных элементах и различных реакторных установках. Тем не менее, руководящего документа по расчету скорости ЭКИ по данным контроля до сих пор нет.

Для расчета значений параметра $S_{\text{доп}}$ в отрасли разработан руководящий документ эксплуатирующей организации – РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010 «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистой сталей при эрозионно-коррозионном износе» [2], основанный на ОСТ типоразмеров элементов, которые могут быть использованы при определенных условиях нагружения, свойствах металла, а также на величине размыва, фиксируемого при эксплуатационном контроле – чем меньше величина размыва, тем меньше может быть допустимая толщина стенки.

Этот документ постоянно развивается в части расчета различных типов элементов. Однако практика использования тех или иных типоразмеров трубопроводов показывает, что их перечень существенно шире представленного в бумажном варианте РД. Поэтому возникает проблема расчета допустимых толщин, во-первых, для реально используемых элементов, во-вторых, в режиме *on-line*.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) является наиболее распространенным механизмом повреждения оборудования и трубопроводов АЭС, изготовленных из углеродистых сталей с примесями хрома и меди. Ряд аварий на зарубежных и отечественных АЭС, причиной которых явился ЭКИ элементов трубопроводов, послужили основанием для поиска средств предотвращения подобных событий, а также для разработки регламента контроля и средств прогнозирования интенсивности ЭКИ.

Введенный в действие с 29.10.2012 г. РД распространяется на весь жизненный цикл элементов оборудования и подчеркивает, что «...нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов ... приведены для состояния элементов на дату следующего контроля толщин стенок».

Однако в данный РД включен далеко не весь перечень типоразмеров. К тому же реальные параметры эксплуатации могут существенно отличаться от указанных в РД по давлению, температуре или тому и другому вместе. Поэтому актуальным является разработка программного комплекса, аналогичного данному РД, но позволяющему рассчитывать допустимые толщины в альтернативных условиях. Основные принципы назначения допустимых толщин – сохранение консервативности расчетов, базирование на ОСТ, «Нормах расчета на прочность ...» ПНАЭ-Г-7-002-86 [3], расчете характеристического размера элемента трубопровода и анализе действующих напряжений. Главная трудность разработки состоит в том, что все многообразие значений давлений и температур искусственно разбито на шесть групп: $P = 11,77$ МПа, $T = 250^\circ\text{C}$; $P = 8,44$ МПа, $T = 300^\circ\text{C}$; $P = 5,89$ МПа, $T = 275^\circ\text{C}$; $P = 3,92$ МПа, $T = 200^\circ\text{C}$; $P = 1,75$ МПа, $T = 200^\circ\text{C}$; $P = 0,64$ МПа,

$T = 195^\circ\text{C}$. Реальные значения этих параметров должны быть идентифицированы программой так, чтобы обеспечить достоверность и консервативность расчетов. Разработанное программное обеспечение может использоваться как автономно, так и в составе систем более высокого уровня.

АЛГОРИТМ

Основную роль в расчете допустимой толщины стенки играет номинальное допустимое напряжение, определяемое по характеристикам материала при расчетной температуре – пределам текучести, прочности, длительной прочности:

$$[\sigma] = \{R_m^T / n_m; R_{p0,2}^T / n_{0,2}\},$$

где R_m^T – рассчитываемое минимальное значение временного сопротивления при температуре эксплуатации, МПа; $R_{p0,2}^T$ – минимальное значение предела текучести при температуре эксплуатации T , МПа; $n_m, n_{0,2}$ – коэффициенты запаса прочности по временному сопротивлению и по пределу текучести соответственно.

Так как в РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010 представлена не вся номенклатура типоразмеров элементов, используемых на атомных станциях, и, как следствие, ограниченный перечень возможных эксплуатационных характеристик, был реализован алгоритм расчета промежуточных значений номинального допустимого напряжения, основанный на ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» [3], благодаря которому в программных модулях существует возможность свободного ввода давления, расчетной температуры и типоразмера элемента. Для этого алгоритма разработана база данных, в которой хранятся значения физико-химических свойств металлов, что позволяет производить расчеты всех возможных типоразмеров элементов при реальных условиях эксплуатации. На данный момент в базе представлены все используемые на станциях марки стали и их физико-химические свойства. Реализована возможность расширения перечня металлов и их свойств.

В связи с тем, что алгоритм расчета промежуточных значений номинального допустимого напряжения (по прочности) основан на [3], существуют ограничения по его использованию:

- при температурах, превышающих максимальное разрешенное значение [3], допускаемое напряжение не определяется, т.к. это повлечет за собой игнорирование учета длительных характеристик прочности (т.е. предела длительной прочности);
- физико-механические характеристики материалов приняты согласно ПНАЭ Г-7-002-86 [3]. Промежуточные значения характеристик материала определяются линейной интерполяцией вида

$$R_m^T = R_m^{T_1} + (R_m^{T_1} - R_m^{T_2}) \cdot (T_2 - T) / (T_2 - T_1),$$

где R_m^T – рассчитываемое минимальное значение временного сопротивления при температуре эксплуатации, МПа; $R_m^{T_1}, R_m^{T_2}$ – известные значения минимального значения временного сопротивления при температурах эксплуатации T_1 и T_2 соответственно; T – расчетное значение температуры.

$$R_{p0,2}^T = R_{p0,2}^{T_1} + (R_{p0,2}^{T_1} - R_{p0,2}^{T_2}) \cdot (T_2 - T) / (T_2 - T_1),$$

где $R_{p0,2}^T$ – минимальное значение предела текучести при температуре эксплуатации T , МПа; $R_{p0,2}^{T_1}, R_{p0,2}^{T_2}$ – известные значения предела текучести при температурах T_1 и T_2 соответственно.

Перед расчетом элемента трубопровода с эксплуатационными характеристиками, отличными от РД и [3], осуществляется проверка базы данных на предмет существования заданных параметров расчета. При обнаружении совпадений номинальное напря-

жение не рассчитывается, а берется из базы данных. Если при проверке базы не были обнаружены требуемые параметры, то программный модуль рассчитывает значения по формулам, приведенным выше, и результат помещается в базу данных, откуда может быть вызван для других расчетов.

В связи с тем, что номинальное допускаемое напряжение не зависит от формы элемента трубопровода, рассчитанные ранее значения, например, для прямого участка, могут использоваться для расчетов других элементов, выполненных из той же стали.

После определения допускаемого номинального напряжения происходит расчет допустимой толщины стенки трубопровода выбранного элемента. На настоящий момент методики расчета приведены для трех групп элементов: прямой участок, гибы и круто-изогнутые гибы (рассчитываются по одной методике), а также зоны околошовных соединений.

Алгоритм расчета представляет собой запрограммированные методики определения допустимой толщины стенки элемента трубопровода в соответствии с РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010 [2]. Методики расчета различных элементов существенно отличаются.

Рассмотрим принцип работы приложения по расчету допустимой толщины стенки трубопровода на примере прямого участка.

Инициализация работы программы начинается с введения необходимых параметров в форму (рис. 1).

Рис. 1. Форма ввода исходных данных

Примечание. До начала расчета пользователь должен выбрать марку стали и ее сортамент для рассчитываемого элемента, так как это необходимые условия расчета номинального допускаемого напряжения, заданного в ПНАЭ Г-7-002-86. В РД для стали «20» номинальное напряжение рассчитано относительно сортамента «Поковки диаметром до 300 мм, КР215*», в программном модуле ему соответствует запись «300КР215» в выпадающем списке «Сортамент стали».

Вначале выполняется обращение к базе данных. Если введенные параметры отличаются от содержимого базы, то производится расчет номинального напряжения по формулам, описанным выше, занесение новых данных в базу и подключение модуля расчета прямого участка. Модуль представлен в виде элемента динамической библиотеки, алгоритм которого основан на методике расчетов по РД.

Затем определяется расчетная толщина стенки трубопровода по формуле

$$S_{RT}^* = PD_a / (2\varphi_T[\sigma] + P),$$

в которую входит номинальное напряжение, рассчитанное для введенной температуры. Здесь P – давление, МПа; D_a – диаметр трубы, мм; φ_T – расчетный коэффициент снижения прочности.

Следующий шаг – определение допускаемой толщины стенки прямого участка по формуле

$$S_{RT} = \max \{ (S_{RT}^* + 0,2 \text{ мм}), (0,5S_{\text{ном}} + 0,2 \text{ мм}) \}.$$

Далее производится расчет понижающего коэффициента для локального утонения

по формуле

$$\beta = \{(1 - \exp[-L_a L_t / (4R \cdot S_{RT})]) / (1 - \exp[-L_a L_t / (4R \cdot S_{RT})])\}^{0.5},$$

где L_a – размер дефекта в осевом направлении, мм; L_t – размер дефекта в окружном направлении, мм; R – срединный радиус трубы, мм.

Этот коэффициент используется на последнем шаге для расчета значений допустимой толщины стенки прямого участка в зоне локального утонения: в осевом направлении – не более $8 \cdot (RS_{RT})^{0.5}$, в окружном – не более $0,25 \cdot D_a$.

Значение допустимой толщины стенки S_{LT} прямого участка трубопровода при нагружении его внутренним давлением в зоне локального утонения вычисляют по формуле

$$S_{LT} = \beta \cdot S_{RT}.$$

На этом этапе расчет произведен полностью. Пользователю выводятся все рассчитанные значения в виде (рис. 2), аналогичном бумажному варианту РД.

Расчет											
Условный проход	Сталь	Геометрия трубопровода		Расчетная толщина	Допустимая толщина	Lct, мм	Допустимая толщина стенки трубопровода Slt в зоне локального утонения, мм				
		Da, мм	Sном, мм				1	2	3	4	5
12	20	16	2	7,82	8	12,56	3,4	5,4	7,2	7,8	8
Номинальное напряжение: 130,7											

Рис. 2. Вывод результатов расчетов

Программный комплекс (ПК) выполнен в режиме «одного окна» с элементами пользовательской графики. Пользовательский интерфейс содержит три вкладки – «Прямой участок», «Отводы гнутые», «Сварные соединения», что позволяет вести расчет трех групп элементов трубопроводов АЭС, не переключаясь между окнами.

По сути, запрограммированная методика расчета допустимых толщин элементов трубопроводов АС дает возможность вычислить допустимую толщину стенки, понизив при этом консерватизм расчетов путем более точной оценки остаточной толщины стенки трубопровода.

Расчетный модуль v1.2

Файл Справка

Прямой участок | Отводы гнутые | Сварные соединения

Исходные значения

Наружный диаметр, мм: 16

Сортамент стали: 300КП215

Рабочее внутреннее давление, МПа: 250

Марка стали: 20

Температура, С: 250

Номинальная толщина стенки, мм: 2

Расчет

Условный проход	Сталь	Геометрия трубопровода		Расчетная толщина	Допустимая толщина	Lct, мм	Допустимая толщина стенки трубопровода Slt в зоне локального утонения, мм				
		Da, мм	Sном, мм				1	2	3	4	5
12	20	16	2	7,82	8	12,56	3,4	5,4	7,2	7,8	8

Номинальное напряжение: 130,7

Рис. 3. Общий вид окна программы

ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование программного продукта проводилось более чем на пятидесяти элементах, приведенных в РД. В итоге программный продукт показал совпадение (с точностью до 3%) рассчитанных параметров со значениями, приведенными в РД. В таблице 1 приведено сравнение РД (предпоследняя строка «РД») с результатами работы комплекса (последняя строка «ПК»); параметр $L_{ct} = 0,25\pi D_a$, мм.

Таблица 1

Расчетные данные из РД и программного комплекса

Исходные данные: $P = 11,77$ МПа; $T = 250$ °C; $[\sigma] = 130,67$ МПа (сталь 20)											
Условный проход	Марка стали	Геометрия трубопровода		Расчетная толщина	Допустимая толщина	L_{ct} , мм	Допустимая толщина стенки трубопровода S_{LT} в зоне локального утонения, мм				
							$L_a / (R \cdot S_R)^{0.5}$				
D_y , мм		D_a , мм	$S_{НОМ}$, мм	S^*_{RT} , мм	S_{RT} , мм		1	2	4	6	8
РД: 300	20	325	19	14,01	14,2	255	13,2	13,9	14,1	14,2	14,2
ПК: 300	20	325	19	14	14,2	255,125	13,1	13,5	14,2	14,2	14,2

Рассмотрим прямой участок трубопровода 108×6 мм (табл. 2, Кольская АЭС) и проведем сравнительный анализ результатов между РД и программным комплексом.

Таблица 2

Характеристика прямого участка

№ схемы	№ заключения	Код	Типоразмер, мм	P , кг/см ² ; МПа	T , °С
И-107	Д7225-И-107-Л1	Прямой участок	108×6	109; 10.69	170

По данным таблицы 2 произведем выборку из РД по следующему наивысшему давлению от реального для сохранения консервативности расчетов. В силу того, что в РД всего восемь групп эксплуатационных характеристик, расчетная температура будет завышена на 80°С и составит 250°С. Выборка приведена в табл. 3 (строка «РД»).

Таблица 3

Сравнение результатов РД и программного комплекса

Исходные данные: $P = 11,77$ МПа; $T = 250^{\circ}\text{C}$; $[\sigma] = 130,67$ МПа (сталь 20)											
Условный проход	Сталь марки	Геометрия трубопровода		Расчетная толщина	Допустимая толщина	L_{ct} , мм	Допустимая толщина стенки трубопровода S_{LT} в зоне локального утонения, мм				
							$L_b / (R \cdot S_R)^{0.5}$				
		D_y , мм		D_a , мм	$S_{ном}$, мм		S^*_{RT} , мм	S_{RT} , мм	1	2	4
РД: 100	20	108	8	4,65	4,8	84,8	4,5	4,7	4,8	4,8	4,8
ПК: 96	20	108	6	4,11	4,3	84,78	3,4	4,1	4,3	4,3	4,3

При расчетах с помощью программного комплекса значения температуры, рабочего давления и типоразмера выбираются по данным табл. 2 и вводятся пользователем: $P = 10,67$ МПа; $T = 170$ °С; $[\sigma] = 134,7$ МПа (сталь 20). Результаты показаны в табл. 3 (строка «ПК»). Таким образом, расчет с использованием разработанного комплекса снижает излишнюю консервативность РД (более высокая температура, иная толщина стенки) в данном случае на 0,5 мм, что позволит эксплуатировать элемент существенно дольше.

Такое уточнение с учетом согласования результатов с РД (расхождение менее 3%) дает возможность более точного расчета скорости ЭКИ в элементах трубопроводов АЭС.

ВЫВОДЫ

1. Номенклатура типоразмеров на всех блоках атомных электростанций существенно превышает представленную в РД, поэтому возникает проблема расчета допустимых толщин стенок для тех трубопроводов, условия работы которых и типоразмеры отличаются от указанных в РД.

2. Допустимая толщина стенки (для обеспечения консервативности) может быть выбрана из варьируемых условий по давлению, температуре или типоразмеру. Рекомендации РД для этих случаев и результаты, полученные с помощью программного комплекса, практически совпадают.

3. В настоящее время разработаны программы для прямых участков, гибов, крутоизогнутых гибов, а также для сварных соединений. Формат вывода результатов полностью соответствует таблицам РД.

4. Расчетные модули, входящие в разработанный программный комплекс, имеют собственный пользовательский интерфейс, что позволяет использовать их как независимое программное обеспечение. В то же время модули выполнены в виде динамических библиотек, что обуславливает их встраиваемость в проекты более высокого уровня.

Литература

1. Гулина О.М., Бараненко В.И., Докукин Д.А., Янченко Ю.А. О расчете скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса трубопроводов АЭС// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 55-63.
2. Руководящий документ эксплуатирующей организации РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010 «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе». Введен в действие с 29.10.2012 г.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат. 1989. – 525 с.

Поступила в редакцию 17.12.2013 г.

Авторы

Щербаков Александр Владимирович, аспирант

E-mail: alex@sitetokey.net

Гулина Ольга Михайловна, доктор техн. наук, профессор

E-mail: olga@iate.obninsk.ru

Сальников Николай Леонидович, доктор техн. наук, профессор

E-mail: salnikov@iate.obninsk.ru

УДК 621.039

CALCULATION CODE TO ESTIMATE ADMISSIBLE THICKNESS OF NPP EQUIPMENT COMPONENTS UNDER FLOW-ACCELERATED CORROSION

Scherbakov A.V., Gulina O.M., Salnikov N.L.

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

ABSTRACT

The paper presents a calculation code to estimate admissible wall thickness of NPP pipelines made of carbon steel to evaluate residual service life under flow-accelerated corrosion. The code is in full compliance with the industry-specific Regulatory Document RD EO 1.1.2.11.0571-2010. The key principles of development are reliability and conservatism of the code calculation, reliance on nuclear industry rules and regulations, estimation of the piping component characteristic size and analysis of working stresses. A data base on physical and chemical properties of metals was developed for algorithm realization. This makes it possible to calculate admissible thickness of different types of component sizes under real operating conditions. The data base includes all steel grades used in the nuclear industry and their physical and chemical properties. In addition, the possibility of increasing the metal nomenclature is realized. So far, calculation procedures have been realized for straight parts, bends and weld-adjacent zones. The results obtained are in full compliance with the Regulatory Document RD EO 1.1.2.11.0571-2010. The calculation code was tested on more than fifty components. Good agreement of the calculated parameters with the values in the Regulatory Document RD EO 1.1.2.11.0571-2010 has been achieved (error of less than 3%). The main advantage of the code presented is the possibility to perform calculations for any element size under any admissible conditions in accordance with the operating rules and regulations.

Key words: flow-accelerated corrosion, admissible thickness of piping, computer code, pressure, strength, service life.

REFERENCES

1. Gulina O.M., Baranenko V.I., Dokukin D.A., Yanchenko Y.A. O raschete skorosti erozionno-korroziionnogo iznosa i ostatochnogo resursa truboprovodov AES [Researching of erosion-corrosion wear in pipelines: the rate and residual lifetime estimation]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2010, no. 2, pp. 55–63.
2. Rukovodiyaschij dokument ekspluatiruyushej organizatsii RDEO 1.1.2.11.0571-2010 "Normy dopuskaemyh tolschin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistykh stalej pri erozionno-korroziionnom iznose". VNIIAES. Vveden v dejstvie s 29.10.2012 g. [Standard RD EO 1.1.2.11.0571-2010 "Norms of piping admissible thickness from carbon steels under flow-accelerated corrosion"] (in Russian).
3. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh energeticheskikh ustanovok (PNAE G-7-002-86). Gosatomenerg nadzor SSSR (Pravila i normy v yadernoj energetike) [Standard of strength calculation for equipment and piping of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1989. 525 p. (in Russian).

Authors

Scherbakov Aleksandr Vasil'evich, Postgraduate Student

E-mail: alex@sitetokey.net

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

E-mail: olga@iate.obninsk.ru

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

E-mail: salnikov@iate.obninsk.ru