

УДК 621.039.531:620.193

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-26-33

Методические особенности конечно-элементного исследования прочности трубопроводов водо-водяных энергетических реакторов с учётом локальных утонений от воздействия эрозионно-коррозионных процессов

А.Е. Гусаров, В.Б. Озеров, Л.В. Сергеева

Работа посвящена особенностям методики прочностных расчётов трубопроводов второго контура атомных электрических станций (АЭС) с учётом локальных утонений, возникающих в результате эрозионно-коррозионных процессов. Приведены отличия эрозионно-коррозионных процессов в однофазном и двухфазном потоках.

Геометрические особенности трубопроводов имеют существенное значение не только для оценки интенсивности эрозии-коррозии металла, но и для итоговой прочностной оценки, в частности, при расчёте на прочность трубопроводов, получивших локальные утонения стенок. Точность прогнозов срока эксплуатации трубопроводных конструкций напрямую зависит от расчета прочности элементов трубопроводов, получивших локальные утонения, особенно, если они имеют сложную форму. К таким элементам можно отнести колена, патрубки, адаптеры (переходы), обечайки. Все они являются тонкостенными конструкциями сложной формы, и для их расчётного исследования наилучшим образом подходят программные комплексы типа «ERCO», «PELBOW». Указанные программы базируются на оболочечной конечно-элементной методике, позволяющей задавать толщину в каждом узле конечного элемента либо с помощью определённых зависимостей, либо (в отдельных случаях) вручную. Участок трубопровода, в соответствии с трёхмерной конечно-элементной теорией толстостенных оболочек, можно аппроксимировать сеткой конечных изопараметрических трехмерных элементов толстой оболочки. Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) существенным образом зависит от химического состава сталей. Представлено сравнение отечественной стали 10Х9МФБ и близкой по химическому составу, а также по эксплуатационным характеристикам, хорошо зарекомендовавшей себя и широко используемой для трубопроводов АЭС зарубежной стали P91 с целью рекомендации стали 10Х9МФБ к использованию.

Ключевые слова: локальные утонения, эрозионно-коррозионный износ, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, трубопроводы.

Для цитирования: Гусаров А.Е., Озеров В.Б., Сергеева Л.В. Методические особенности конечно-элементного исследования прочности трубопроводов водо-водяных энергетических реакторов с учётом локальных утонений от воздействия эрозионно-коррозионных процессов // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 26—33. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-26-33.

Methodological Features of a Finite-element Analysis Aimed at Studying the Strength of LWR Pipelines Taking into Account Local Thinning Caused by Flow Accelerated Corrosion

А.Е. Gusarov, V.B. Ozerov, L.V. Sergeeva

The methodological features pertinent to strength analysis of the pipelines used in the secondary coolant circuit of nuclear power plants (NPPs) with taking into account local thinning caused by flow accelerated corrosion processes are addressed.

The geometric features of pipelines are essential not only for assessing the flow accelerated corrosion intensity in metal, but also for the final strength assessment, in particular, in analyzing the strength of pipelines with walls containing local thinning spots. The pipeline structure lifetime prediction accuracy depends directly on the strength analysis of pipeline elements in which local thinning spots have occurred, especially if these elements themselves have a complex shape. Elbows, sockets, adapters (transitions), and shell rings can be referred to such elements. All of them are thin-walled structures having a complex shape. Software systems like ERCO and PELBOW are best suited for numerically studying them. These computer programs are based on the shell finite element method, using which the thickness at each finite element node can be specified either in the form of certain dependencies or (in some cases) manually. In accordance with the 3D finite element theory of thick-walled shells, a pipeline section can be approximated by a mesh of finite isoparametric 3D elements of a thick shell. The flow accelerated corrosion wear (FACW) depends essentially on the chemical composition of steels. Domestically produced Grade 10Kh9MFB steel is compared with foreign Grade P91 steel (that is close to the former in chemical composition and in performance characteristics), which has positively proven itself and widely applied for making NPP pipelines, with a view to recommend Grade 10Kh9MFB steel for use.

Key words: local thinning, flow accelerated corrosion wear, computer modeling, finite element method, pipelines.

For citation: Gusarov A.E., Ozerov V.B., Sergeeva L.V. Methodological Features of a Finite-element Analysis Aimed at Studying the Strength of LWR Pipelines Taking into Account Local Thinning Caused by Flow Accelerated Corrosion. Bulletin of MPEI. 2020;2: 26—33. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-26-33.

Введение

По мере увеличения продолжительности эксплуатации трубопроводов и оборудования энергоблоков атомной электростанции (АЭС) возрастает значение борьбы с эрозионно-коррозионным износом (ЭКИ), приводящим к свищам и гильотинным разрывам. Полностью устранить ЭКИ невозможно, однако вскрыть основные закономерности этого процесса, можно существенно затормозить его.

Наиболее сложное по своей природе и значительное по масштабу разрушений — явление эрозии-коррозии металла в одно- и двухфазных потоках, т. е. во влажнопаровом тракте электростанции. Под эрозией-коррозией следует понимать совокупность физико-химических процессов образования защитного слоя продуктов коррозии на металле с одной стороны, и их растворение и вынос в поток, с другой.

Эрозионно-коррозионные повреждения, если не рассматривать катастрофические последствия, снижают безопасность, надежность, эффективность эксплуатации АЭС и ведут к значительным экономическим потерям. Прямые и косвенные экономические потери, обусловленные эрозией-коррозией металлов, загрязнением рабочего тела и образованием железосодержащих отложений, включают недовыработку электроэнергии, дополнительные эксплуатационные затраты и издержки на сервисное обслуживание. Предотвращение и предупреждение эрозионно-коррозионных повреждений металла оборудования и трубопроводов АЭС в период эксплуатации требует постоянных расходов на выполнение контрольно-диагностических мероприятий, поддержание нормативных параметров водно-химического режима и обеспечение оперативного контроля. Значительные средства на сервисное обслуживание необходимы для ликвидации последствий эрозионно-коррозионного воздействия и проведения ремонтно-восстановительных работ, очистки элементов оборудования от отложений, обеспечения защиты металлов рабочего тракта АЭС от стояночной коррозии.

Обеспечение эрозионно-коррозионной стойкости металлов энергетического оборудования — важнейшая задача развития отечественной электроэнергетики, решение которой невозможно без применения современных расчетных средств и специализированных программных комплексов. Кроме того, оптимизировать объём и сроки эксплуатационных проверок практически невозможно без компьютерного моделирования и, в частности, моделирования эрозионно-коррозионных процессов.

При создании подобного рода программ необходимо обращаться к достижениям гидродинамики одно- и двухфазного потока, химии, прочности и ряда других дисциплин.

Наиболее сложными и менее изученными являются процессы эрозии-коррозии металла в двухфазных потоках. Они принципиально отличаются от процессов в

однофазном водном потоке. Это обусловлено тем, что двухфазный поток характеризуется образованием на поверхности обтекания тонкой жидкой пленки, которая находится в контакте с металлом. Фактически через жидкую пленку основной двухфазный поток взаимодействует с металлом. Это обстоятельство кардинально отражается на процессах массопереноса, влияющих на интенсивность отвода продуктов растворения защитного оксидного слоя в ядро потока. В данном случае процессы массопереноса в жидкой пленке и двухфазном пограничном слое — определяющие процессы эрозионного фактора явления эрозии-коррозии.

Коррозия металла в двухфазном потоке, также имеет принципиальные отличия по сравнению с однофазным водным потоком. Это продиктовано особенностями формирования химического состава и коррозионных свойств пленки, вследствие межфазового перераспределения коррозионно-агрессивных примесей и подщелачивающих коррекционных веществ.

Для оценки и прогнозирования эрозии-коррозии металла в двухфазном потоке в настоящее время применяют некоторые расчетные коды для однофазной среды путем введения либо дополнительного коэффициента, учитывающего изменения степени влажности, либо введением вместо скорости водного потока расчетной величины среднерасходной скорости течения жидкой пленки по поверхности металла.

Так, фирма «АВВ» (Asea Brown Boveri) предлагает упрощенную расчетную формулу для оценки интенсивности эрозии-коррозии металла в двухфазном водном потоке:

$$S = f(t)Ky^{0.5}W,$$

где $f(t)$ — функция, учитывающая влияние температуры; K — коэффициент, отражающий геометрию канала элемента; y — степень влажности пара; W — среднерасходная скорость двухфазного потока.

При этом значение степени влажности пара определяет режим течения жидкой пленки и интенсивность процессов массопереноса в ней.

Двухфазный поток взаимодействует с обтекаемой поверхностью металла посредством массо-, теплообмена и трения. Процессы массообмена в пограничном слое определяют интенсивность подвода коррозионно-активных реагентов к поверхности металла и отвода продуктов коррозии в поток, что считается основным гидродинамическим фактором, характеризующим скорость ЭК металла, которую следует рассматривать как взаимосвязанные процессы. С одной стороны — это образование защитного оксидного слоя (продуктов электрохимической коррозии) на поверхности металла, а с другой стороны — его растворение и вынос в поток.

Основные параметры, описывающие защитное действие оксидного слоя, — плотность и хорошая адгезия, малая пористость, отсутствие напряжений и трещин,

сплошность и толщина. Разрушение и утонение оксидного слоя происходят путем отвода в поток растворенных и нерастворенных оксидов вследствие процессов массообмена в пристенном слое жидкости.

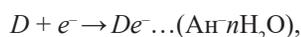
Коррозионная составляющая ЭК в двухфазном влажнопаровом потоке в подавляющем большинстве случаев имеет электрохимическую природу. В этих условиях состояние металлов при контакте с электролитом (жидкой фазой) термодинамически неустойчиво.

При электрохимической коррозии сталей протекают два взаимосвязанных процесса. Анодный процесс окисления металла с переходом ионов железа в электролит и накопление эквивалентного количества электронов в металле выражаются соотношением:



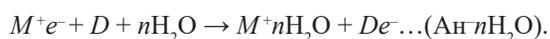
где M^+e^- — атомы металла; e^- — электролит; M^+nH_2O — гидратированные ионы металла.

Катодный процесс обладает ассимиляцией избыточных электронов депполяризаторами (частицами окислителями) в электролите на катоде:



где D — частицы-деполяризаторы; De^- — восстановительные частицы-деполяризаторы; $An \cdot nH_2O$ — анионы, возникающие в результате гидратации восстановительных частиц-деполяризаторов.

Таким образом, токообразующая реакция выглядит так:



Электрохимическая коррозия стали в электролите, содержащем ионы водорода и кислорода, испытывает торможение со стороны образующихся продуктов коррозии, вследствие чего система вода–железо отклоняется от равновесного состояния.

При отсутствии кислорода в диапазоне температур 100...300 °C результатом электрохимической коррозии становится образование защитного слоя магнетита:



При обтекании металла двухфазным потоком роль движущего электролита выполняет жидкая пленка. Основное отличие коррозионной составляющей в двухфазном потоке заключается в том, что в технологических контурах электростанций качество и свойства воды (питательной воды и конденсата) могут существенно отличаться от качества жидкой фазы (влажнопарового тракта). Локальные водно-химические параметры и массоперенос в жидкой пленке формируют условия протекания эрозионно-коррозионных процессов в двухфазных потоках.

С достаточной степенью точности можно считать,

что в однофазном водном потоке параметры, определяющие характер и интенсивность коррозионного фактора (рН, электропроводность, концентрации кислорода, железосодержащих соединений, подщелачивающих добавок, примесей и др.), незначительно меняются по сечению и вдоль канала. Другими словами, при моделировании процессов ЭК металлов в однофазном водном потоке вполне допустимо использование осредненных по потоку значений параметров водно-химического режима. Опыт эксплуатации и исследования показывают, что в утонении металла при течении однофазного водного потока могут участвовать исключительно эрозия-коррозия, кавитационная и абразивная эрозии и стояночная коррозия.

Развитие методов прогнозирования и предупреждения эрозионно-коррозионных повреждений оборудования АЭС сдерживается тем, что используемые для учета влияния особенностей гидродинамики потока на интенсивность эрозии-коррозии геометрические коэффициенты не позволяют решать практически важные задачи:

- не указывают конкретной зоны локальной ЭК (наибольшего утонения) в элементах трубопроводов и оборудования;
- не учитывают влияние предвключенного участка на месторасположение зоны и интенсивность локального эрозионно-коррозионного (ЛЭК) — наибольшего утонения;
- геометрические коэффициенты не отражают значительную разницу в интенсивности и расположении зон локального утонения элементов, работающих в водном и влажнопаровом потоках;
- значения геометрических коэффициентов в различных источниках имеют существенный разброс в величинах (табл. 1) [1, 2].

Геометрические особенности трубопроводов существенны не только для оценки интенсивности эрозии-коррозии металла, но и для итоговой прочностной оценки, в частности, и при расчёте локальных утонений стенок трубопроводов, которым в последнее время уделяется существенное внимание, и которые могут превышать величину поправок на общую коррозию, приводимую в нормах расчёта на прочность [3, 4].

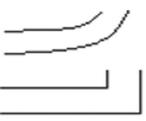
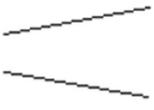
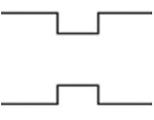
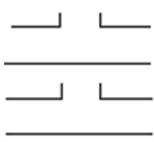
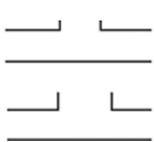
Скорость ЭКИ [5] стенки с помощью программных средств ЭКИ-02, ЭКИ-03 рассчитывают по уравнению:

$$W_{\text{эки}} = C_0 F_1(T) F_2(XC) F_3(v) F_4(O_2) F_5(pH) \times \\ \times F_6(K_k) F_7(\alpha) F_8(A) F_9(\tau),$$

где $W_{\text{эки}}$ — скорость коррозии, мм/год; C_0 — коэффициент, равный 1 мм/год; $F_1(T)$, $F_2(XC)$, $F_4(O_2)$, $F_5(pH)$, $F_6(K_k)$, $F_7(\alpha)$, $F_8(A)$, $F_9(\tau)$ — коэффициенты, учитывающие температуру, состав металла, концентрацию кислорода, значение рН, геометрию трубопровода (с помощью коэффициента Келлера), влажность пара (для однофазной среды $F_7(\alpha) = 1$), используемый амин (аммиак, морфалин, этаноламин) и длительность эксплуа-

Таблица 1

Значения геометрических коэффициентов для компонентов трубопроводов

Характерная геометрия канала	Форма канала	Геометрические коэффициенты эрозии-коррозии				
		Keller (1974)	Chexal-Horowitz (1989)	Remy (1991)	Woolsey (1990)	Kastner (1990)
Прямая труба		1,0				
Отводы (гибы)		5,75...13	3,7	2,1	1,7	6,0...11
Суживающийся канал		—	1,8...2,5	3,2	—	—
Входной участок трубы		4,0	—	—	2,5	3,61...6,24
Расширяющийся канал		—	2,8...3,0	3,6	—	—
Сужение		4,0...6,0	5,0	2,9	3,0...4,0	—
Тройник (слияние потоков)		3,75	5,0	5,7	2,0...2,5	—
Тройники (разделение потоков)		18,75	4,0...5,0	5,7	—	—

тации элемента; $F_3(v)$ — коэффициент, определяемый скоростью среды.

Для сравнения использованы зависимости, полученные в АО «Атомпроект» (Санкт-Петербург) [6].

Точность прогнозов срока эксплуатации трубопроводных конструкций в первую очередь зависит от расчета прочности элементов трубопроводов, получивших локальные утонения, особенно, если они имеют сложную форму (колена, патрубки, адаптеры (переходы), обечайки (рис. 1)). Все перечисленные элементы являются тонкостенными конструкциями сложной формы. Для их расчётного исследования применяют программные комплексы типа «ERCO», «PELBOW», опирающиеся на оболочечную конечно-элементную методику [6], позволяющую задавать толщину в каждом узле конечного элемента либо с помощью определённых зависимостей, либо (в отдельных случаях) вручную. Допустимая глубина сплошной коррозии C_2 за 30 лет эксплуатации устанавливается нормами [3].

Участок трубопровода в соответствии с трёхмерной конечноэлементной теорией толстостенных оболочек можно аппроксимировать сеткой конечных изопараметрических трехмерных элементов толстой оболочки. Указанная процедура подразумевает задание координат узлов, лежащих на срединной поверхности, вектора нормали к срединной поверхности и толщины оболочки в каждом узле, что практически позволяет моделировать утонение любой формы.

Расчеты, выполненные с помощью «ERCO» и «PELBOW» [7, 8], подтвердили, что возрастание напряжений, связанное с наличием локальных утонений, сильно зависит от характера убывания толщины.

В программе утонение предполагается задавать с помощью эмпирических формул, а прочностную задачу решать шагами по времени.

Разработанная методика и программа, кроме всего прочего, учитывают потери давления на гидравлическом сопротивлении с помощью формулы Вейсбаха:

$$\Delta P = \xi_p \frac{V^2}{2} \rho,$$

где ΔP — потери давления на гидравлическом сопротивлении; ξ_p — коэффициент местного сопротивления (коэффициент Дарси); V , ρ — средняя скорость течения и плотность жидкости.

Если гидравлическое сопротивление представляет собой участок длиной L и диаметром d , то коэффициент местного сопротивления определяют как:

$$\xi_p = \lambda \frac{L}{d},$$

где λ — коэффициент потерь на трение по длине.

Тогда формула Вейсбаха для потерь давления приобретает вид:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d} \frac{V^2}{2} \rho.$$

Возникновение эрозионно-коррозионных утонений провоцирует появление и рост трещин, которые, в частности, могут стать результатом межкристаллитной коррозии. Считается, что этот вид коррозии чаще всего поражает конструкции, изготовленные из нержавеющей стали, и обычно возникает в зоне сварных швов. Часто одна и та же конструкция бывает одновременно подвержена нескольким видам коррозии.

Анализ повреждаемости и условий эксплуатации АЭС позволяет выделить пять групп оборудования и трубопроводов конденсатно-питательного и влажно-парового трактов второго контура, характеризующихся благоприятными условиями для проявления или сочетания только определенных механизмов повреждения (утонения) металла. Условно влажнопаровой тракт можно разделить на группы I и II, где рабочая поверхность металла находится в контакте с насыщенным и влажным парами. При обтекании металла насыщенным паром практически отсутствуют условия для реализации какого-либо механизма интенсивного утонения. В данном случае возможно коррозионное растрескивание и другие виды старения металла, несущественно влияющие на процесс утонения. Во всем конденсатно-питательном тракте металл подвержен общей и локальной эрозиям-коррозиям (ЛЭК). ЛЭК приводит к преждевременному утонению, а в ряде случаев к разрушению элементов трубопроводов и оборудования АЭС.

Элементы III группы наряду с ЛЭК могут быть подвержены кавитационной эрозии — кавитационным разрушениям, часто возникающим при быстром движении жидкости относительно металла вследствие образования и исчезновения (схлопывания) пузырьков пара вблизи металлической поверхности), поскольку для этого имеются условия в местах повышенного гидравлического сопротивления (рис. 2). Четвертая (IV) группа элементов оборудования и трубопроводов характеризуется возможным вскипанием сепарата и конденсата греющего пара, интенсифицируя ЛЭК.



Рис. 1. Элементы трубопроводов (тонкостенные конструкции сложной формы)

Трубопроводы питательной воды (группа V) обладают наличием условий для реализации ЛЭК и в каналах сложной геометрии кавитационной эрозии (КавЭ).

Практика показывает, что в ряде элементов и узлов как влажнопарового, так и конденсатно-питательного трактов возможно проявление стояночной (атмосферной) коррозии в качестве доминирующего механизма утонения.

Анализируемые механизмы разрушительного воздействия на металл протекают по своим законам, имеют принципиальные отличия в контролирующих параметрах, формах проявления и закономерностях, из чего должны следовать различия в мероприятиях по их предотвращению и методах определения остаточного ресурса элементов оборудования и трубопроводов АЭС.

Поиск доминирующего механизма утонения металла — важнейшая практическая задача, от правильности решения которой зависят точность прогнозирования зоны локального износа и оптимальность принятия мероприятий по предупреждению и ликвидации его последствий.

Сравнительный анализ расчетов по российским и зарубежным кодам показал, что ЭКИ существенным образом зависит от химического состава [8, 9].

Кроме того в результате изучения зарубежных проектов с реакторами типа AP-1000, EPR-1600 было выявлено, что в них активно используют хромистые стали.

В ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» выполнено сравнение стали 10X9MФБ и близкой по химическому составу и эксплуатационным характеристикам широко используемой зарубежной стали P91 (табл. 2). Исходя из результатов сравнения сталь 10X9MФБ также может быть рекомендована к использованию [10].

Заключение

К настоящему моменту разработана методическая база для комплексного исследования эрозионно-корро-

зионных процессов в трубопроводах второго контура с привлечением компьютерных методов. Это позволит получать первые результаты, оценки прочности, обсуждать их, совершенствовать отдельные этапы исследования и подходы в целом.

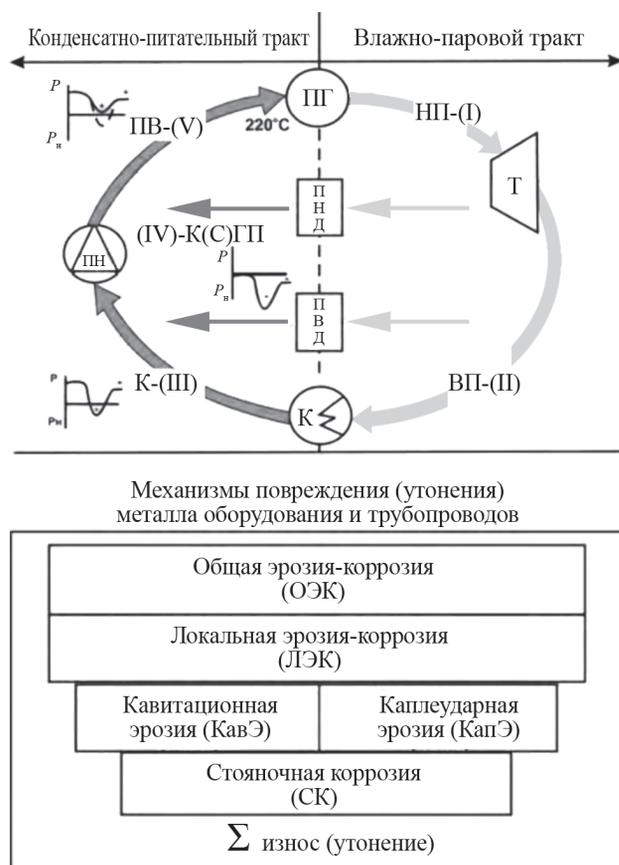


Рис. 2. Классификация групп трубопроводов и оборудования второго контура АЭС по условиям реализации механизмов повреждения (утонения) металла

Таблица 2

Химический состав сталей

Химический состав, %	Марки стали	
	X10CrMoVNb-1 (P91), Европа, Япония, США	10X9MФБ (Ди 82), Россия
C	0,08...0,12	
Cr	8,0...9,5	8,6...10,0
Mo	0,85...1,05	0,60...0,80
W	—	
V	0,15...0,25	0,10...0,20
Nb	0,10...0,20	
Ni	max 0,04	max 0,07
N	0,03...0,07	—
B	—	

Литература

References

1. 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.

2. 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. Серия «Ядерная энергетика». 2016. № 2. С. 55—65.

3. ПН АЭ Г-7-002—86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

4. РД ЭО 1.1.2.11.0571—2015. Нормы допускаемых толщин элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе.

5. Бараненко В.И., Гулина О.М., Нафтали М.М. Арефьев А.А., Юрманов В.А. Использование программных средств для расчета эрозионно-коррозионного износа // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Подольск: Гидропресс, 2013. С. 1—10.

6. Крицкий В.Г. и др. Моделирование водно-химического режима II контура АЭС с ВВЭР // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Подольск: Гидропресс, 2017. С. 1—11.

7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614678 «ERCO» / Л.В. Сергеева // Заявка № 2010612928 от 27.05.10 г.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615610 «PELBOW» / Л.В. Сергеева // Заявка № 2012613175 от 24 апреля 2012 г.

10. Подлатов М.А. Обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводов и оборудования блока АС, потенциально подверженных ЭКИ // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. М.: Атомтехэнерго, 2014. С. 1—38.

11. Новичкова О.В. и др. Снижение эрозионно-коррозионного износа трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Подольск: Гидропресс, 2011. С. 1—2.

12. Озеров В.Б., Сергеева Л.В. Анализ характеристик и оптимизация выбора конструкционных материалов для трубопроводов АЭС с учётом изменения их прочности на всех этапах жизненного цикла // Вестник машиностроения. 2015. № 11. С. 62—69.

1. Gulina O.M., Sal'nikov N.L., Baranenko V.I. Razrabotka Normativnoy Dokumentatsii dlya Upravleniya Resursom Oborudovaniya AES v Usloviyakh Erozionno-korroziionnogo Iznosa. Yadernaya Fizika i Inzhiniring. 2013;3:273—278. (in Russian).

2. Baranenko V.I., Gulina O.M., Sal'nikov N.L., Murzina O.E. Obosnovanie Raschetov Skorosti EKI i ostatochnogo resursa truboprovodov AES po Dannym Ekspluatatsionnogo Kontrolya. Izvestiya Vuzov. Seriya «Yadernaya Energetika». 2016;2:55—65. (in Russian).

3. PN AE G-7-002—86. Normy Rascheta na Prochnost' Oborudovaniya i Truboprovodov Atomnykh Energeticheskikh Ustanovok. (in Russian).

4. RD EO 1.1.2.11.0571—2015. Normy Dopuskaemykh Tolshchin Elementov Truboprovodov iz Uglerodistykh Staley pri Erozionno-korroziionnom Iznose. (in Russian).

5. Baranenko V.I., Gulina O.M., Naftal' M.M. Aref'ev A.A., Yurmanov V.A. Ispol'zovanie Programmnykh Sredstv dlya Rascheta Erozionno-korroziionnogo Iznosa. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy VIII Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Podol'sk: Gidropress, 2013:1—10. (in Russian).

6. Krickiy V.G. i dr. Modelirovanie Vodno-khimicheskogo Rezhima II Kontura AES s VVER. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Podol'sk: Gidropress, 2017:1—11. (in Russian).

7. Zenkevich O. Metod Konechnykh Elementov v Tehnike. M.: Mir, 1975. (in Russian).

8. Svidetel'stvo o Gosudarstvennoy Registratsii Programmy dlya EVM № 2010614678 «ERCO» / L.V. Sergeeva. Zayavka № 2010612928 ot 27.05.10 g. (in Russian).

9. Svidetel'stvo o Gosudarstvennoy Registratsii Programmy dlya EVM № 2012615610 «PELBOW» / L.V. Sergeeva. Zayavka № 2012613175 ot 24 aprelya 2012 g. (in Russian).

10. Podlatov M.A. Obespechenie Bezopasnoy Ekspluatatsii Truboprovodov i Oborudovaniya Bloka AS, Potencial'no Podverzhennykh EKI. Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Atomnoy Energetiki: Materialy IX Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M.: Atomtekhenergo, 2014: 1—38. (in Russian).

11. Novichkova O.V. i dr. Snizhenie Erozionno-korroziionnogo Iznosa Truboprovodov Vtorogo Kontura AES s VVER. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Podol'sk: Gidropress, 2011: 1—2. (in Russian).

12. Ozerov V.B., Sergeeva L.V. Analiz Kharakteristik i Optimizatsiya Vyboru Konstruktsionnykh Materialov dlya Truboprovodov AES s Uchetom Izmeneniya ikh Prochnosti na Vsekh Etapakh Zhiznennogo Cikla. Vestnik Mashinostroeniya. 2015;11: 62—69. (in Russian).

Сведения об авторах:

Гусаров Артём Евгеньевич — аспирант НИЦ «Курчатовский институт»

Озеров Виталий Борисович — аспирант НИЦ «Курчатовский институт»

Сергеева Людмила Васильевна — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: serg-rncki@rambler.ru

Information about authors:

Gusarov Artem E. — Ph.D.-student of NRC «Kurchatov Institute»

Ozerov Vitaliy B. — Ph.D.-student of NRC «Kurchatov Institute»

Sergeeva Lyudmila V. — Dr.Sci. (Techn.), Leading Researcher of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: serg-rncki@rambler.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 12.02.2019

The article received to the editor: 12.02.2019