

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039.58

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-21-27

Анализ вероятности появления течей и разрывов трубопроводов и корпусов оборудования атомных электростанций на основе физико-статистического моделирования процессов разрушения

А.А. Тутнов, О.Д. Лоскутов, П.В. Алексеев, А.В. Тутнова, А.Т. Алексеев

Описаны программное средство (ПС) и реализованная в нем методика, разработанные для проведения вероятностного анализа надежности толстостенных сосудов давления реакторных установок. Приведены основные принципы работы ПС, перечень используемых в расчетах исходных данных и возможных объектов для анализа.

В основу анализа положено моделирование зарождения и развития трещин в материале. Представлено описание методик моделирования начальной дефектности материала с учетом возможности пропуска дефектов при неразрушающем контроле, зарождения и развития трещин в процессе эксплуатации рассматриваемого объекта. Изложена методика оценки прочностных характеристик стенки сосуда давления.

В качестве примера применения ПС на практике даны результаты вероятностного анализа разрушения перфорированной зоны корпуса коллектора первого контура парогенератора ПГВ-1000. Приведены графические зависимости вероятности возникновения течи и разрыва от срока эксплуатации парогенератора и перечень возможных инженерных и научных задач, решаемых с использованием указанного ПС.

Ключевые слова: моделирование, вероятностный анализ разрушения, трещины, сосуды давления.

Для цитирования: Тутнов А.А., Лоскутов О.Д., Алексеев П.В., Тутнова А.В., Алексеев А.Т. Анализ вероятности появления течей и разрывов трубопроводов и корпусов оборудования атомных электростанций на основе физико-статистического моделирования процессов разрушения // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 21—27. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-21-27.

Analyzing the Occurrence Probability of Leaks and Ruptures in NPP Equipment Pipelines and Pressure Vessels Based on Physical and Statistical Modeling of Fracture Processes

A.A. Tutnov, O.D. Loskutov, P.V. Alekseev, A.V. Tutnova, A.T. Alekseev

A software tool (ST) and methodology implemented in it for probabilistically assessing the reliability of reactor thick-walled pressure vessels are described. The basic principles of ST operation, the list of input data used in the computations, and possible objects for analysis are given.

The analysis is based on modeling the incipience and growth of cracks in the material. The techniques used for modeling the initial flaws in material are described that take into account the possibility of missing flaws during non-destructive testing, and for modeling the incipience and growth of cracks during operation of the object under consideration. The technique for assessing the pressure vessel wall strength characteristics is described.

To illustrate practical application of the ST, the results from probabilistically assessing the destruction of the PGV-1000 steam generator primary circuit header's perforated zone are given. Graphic dependences of the leak and rupture occurrence probabilities on the steam generator operation time are presented. The list of possible engineering and scientific problems solved using the developed ST is also given.

Key words: modeling, probabilistic fracture analysis, cracks, pressure vessels.

For citation: Tutnov A.A., Loskutov O.D., Alekseev P.V., Tutnova A.V., Alekseev A.T. Analyzing the Occurrence Probability of Leaks and Ruptures in NPP Equipment Pipelines and Pressure Vessels Based on Physical and Statistical Modeling of Fracture Processes. Bulletin of MPEI. 2020;1:21—27. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-21-27.

Введение

Одним из отечественных средств проведения вероятностного анализа разрушения (ВАР) сосудов давления атомных электростанций (АЭС) является расчетный код МАВР. Однако существуют и другие статистические расчетные методики, позволяющие проводить ВАР сосудов давления реакторных установок (РУ) — например, методики, реализующие метод Монте-Карло, как способ моделирования случайных событий. [1] Преимущественно результаты ВАР используются в качестве исходных данных для вероятностного анализа безопасности (ВАБ) энергоблоков — современного подхода к обеспечению безопасной эксплуатации АЭС.

Вероятностный анализ безопасности сводится к расчету частоты повреждений активной зоны в результате того или иного нарушения эксплуатации. В этом случае он представляет собой математическое моделирование конкретного энергоблока и последовательный анализ цепочек (дереьев) событий и отказов, которые могут привести к реализации нежелательного события (аварии). Этот алгоритм основывается на базе данных по статистике отказов оборудования, влияющих на безопасность, и по надежности оборудования и оперативного персонала. Периодическое выполнение ВАБ сопровождается совершенствованием модели энергоблока и методики анализов.

Анализ строится на учете инициирующих событий, признаваемых возможными. Одна из вероятных причин отказов элементов оборудования РУ, находящегося под давлением теплоносителя, — разгерметизация трубопроводов и корпусных элементов первого и второго контуров по причине образования течи или разрыва по основному металлу или сварным швам. Статистика таких отказов, как правило, недостаточна для количественной оценки надежности оборудования, требуемой при выполнении ВАБ. В этом случае основным способом оценки вероятности отказа оборудования реакторных установок и, соответственно, анализа частот исходных событий, необходимых для ВАБ, считается вероятностный анализ разрушения (ВАР). По существу ВАР — расчет на прочность трубопроводов и корпусов, проводимый при вероятностном задании ряда исходных данных.

Настоящая работа посвящена описанию основных принципов методики программного средства МАВР. Результаты расчетов, полученных с помощью данного программного средства, используются для ВАР элементов первого и второго контуров РУ ВВЭР, проектов АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ, а также зарубежных АЭС «Бушер», «Куданкулам», «Тяньвань», «Ханхикиви», «Пакш». Программа может применяться как на стадии проектирования, так и при оценке остаточного ресурса оборудования.

Основы методики МАВР

Программное средство МАВР-5.1 — инструмент для расчета вероятности возникновения течи и круп-

номасштабного разрушения (разрыва) в процессе эксплуатации толстостенных сосудов давления РУ, таких как трубопроводы первого и второго контуров, корпуса реактора, компенсатора давления, ГЦНА, коллектора парогенератора первого контура (перфорированная зона), фланцевые соединения главного разъема, выемной части и корпуса ГЦНА, крышки и корпуса коллектора первого контура парогенератора.

Расчет осуществляется путем предварительного детерминированного вычисления температурных полей и напряженно-деформированного состояния (НДС) в стенках трубопроводов или корпусов и вероятности возникновения течи и разрыва вследствие зарождения и роста трещин.

Установление нестационарных полей температуры и НДС при проектных режимах работы проходит с использованием специальных или универсальных программных средств, предназначенных для пространственных прочностных расчетов конструкций (УЗОП-1, ANSYS и др.). На основе этих расчетов формируется файл данных, включающий распределение напряжений и температуры в трубопроводе или корпусе при заданных силовых и тепловых нагрузках для проектных режимов эксплуатации, а также остаточные технологические напряжения. Так, при вычислении вероятности разрушения перфорированной зоны коллектора первого контура парогенератора учитываются остаточные напряжения, возникающие при запрессовке теплообменных труб. Они используются программой МАВР как исходные для последующего моделирования.

Другими исходными данными для моделирования являются: характеристики чувствительности и точности дефектоскопического контроля, параметры дефектности в исследуемом объекте (число и размеры дефектов), физико-механические и прочностные свойства основного металла и сварных швов, параметры водно-химического режима теплоносителя, история нагружения объекта в процессе эксплуатации.

Характеристики материала и дефектности задаются в виде гистограмм или законов распределения, полученных путем статистической обработки экспериментальных или эксплуатационных данных. История нагружения объекта моделируется путем задания различных сочетаний режимов, комбинаций этих сочетаний, их периодичности продолжительности во времени.

Исходя из перечисленных исходных данных с использованием теоретических и экспериментальных зависимостей линейной и нелинейной механики разрушения и законов теории вероятностей, ПС МАВР-5.1 осуществляет:

- корректировку заданного начального распределения дефектов материала с учетом вероятности их пропуска при неразрушающем контроле и возможности устранения (ремонта) дефектов с размерами, превышающими допустимые по техническим условиям;
- моделирование процессов зарождения и слияния микротрещин в процессе эксплуатации;

- создание докритического роста трещин в процессе эксплуатации;
- анализ возможных вариантов развития трещины и расчет вероятности реализации приведенных сценариев;
- корректировку распределения трещин по числу и размерам с учетом их зарождения и роста;
- расчет распределения вероятности критических размеров трещин при хрупком, хрупко-вязком и вязком механизмах разрушения;
- учет возможности старта и остановки трещин (помимо докритического подрастания) при заданных вероятностным образом значениях критических параметров для хрупкого, хрупко-вязкого и вязкого механизмов разрушения;
- расчет распределения вероятности максимальных и минимальных значений площади раскрытия сквозной трещины, эквивалентного диаметра и интенсивности течи.

Рассмотрим основные принципы методики программы.

Распределение вероятности размера дефектов материала с учетом вероятности их пропуска при неразрушающем контроле

Дефекты могут моделироваться как полу- или четвертьэллиптические (например, в перфорированной зоне коллектора парогенератора) с отношением полуосей a/c , где a — глубина дефекта [2].

Вероятность обнаружения дефекта с размерами a и c системой неразрушающего контроля $P_k(a, c)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией:

$$P_k(a, c) = P_i + (P_{i+1} - P_i) \frac{a - a_i}{a_{i+1} - a_i}, \quad i = 0, 1, \dots, n,$$

где $n - 1$ — число звеньев кусочно-линейной функции; a_i, P_i — координаты точек перелома кусочно-линейной функции (P_i — вероятность обнаружения дефекта глубиной a_i , если a_i — предел чувствительности средства неразрушающего контроля, то $P_0 = 0$).

Отнормированное распределение размера дефектов после устранения обнаруженных недостатков, размеры которых превышают предельно допустимые, запишем в виде:

$$P_a(a, c) = \begin{cases} P_{a1}(a, c)/(P_k(a, c)G) & \text{при } a \leq a_r; \\ (P_{a1}(a, c)/P_k(a, c) - P_{a1})/G & \text{при } a > a_r, \end{cases}$$

где

$$G = \int_c^\infty \left[\int_0^{a_r} \frac{P_{a1}(a, c)}{P_k(a, c)} da + \int_{a_r}^\infty \left(\frac{P_{a1}(a, c)}{P_k(a, c)} - P_{a1}(a, c) \right) da \right] dc.$$

С целью приведения к единой мере числа дефектов для конструкций различных размеров введем понятие эталонного элемента. Он может характеризоваться как

объемом, так и другими параметрами, например, длиной сварного шва или площадью поверхности.

Вероятностная модель зарождения и слияния микротрещин в процессе эксплуатации

Учитываются следующие механизмы зарождения микротрещин:

- повреждение материала вследствие длительного статического нагружения;
- коррозионное растрескивание;
- повреждение в результате циклического нагружения.

Функция повреждения ω получается путем нелинейного суммирования функций повреждений от действия указанных механизмов:

$$\omega = \left(\omega_a^{m_1} + \omega_b^{m_2} + \omega_c^{m_3} \right)^{m_4},$$

где $\omega_a, \omega_b, \omega_c$ — функции повреждения, отражающие процессы разрушения.

Коэффициенты m_1, m_2, m_3, m_4 определим при математической обработке экспериментальных данных. Условием зарождения микротрещины в рассматриваемой точке является $\omega = 1$.

Деформационную функцию повреждений запишем следующим образом:

$$\omega_a = \int_0^\tau \frac{(\varepsilon_i^p + \varepsilon_i^v) d\tau}{\varepsilon_{np}},$$

где τ — время; $\varepsilon_i^p, \varepsilon_i^v$ — скорости интенсивности деформаций пластичности и ползучести; ε_{np} — экспериментально определяемая предельная деформация при статическом нагружении, зависящая от температуры, скорости нагружения, коррозионных свойств среды и т. д.

При получении функции повреждений коррозионного растрескивания учитывается, что воздействия внешней среды на данные процессы характеризуются диффузионной скоростью проникновения химических элементов в глубинные слои материала. Функция повреждений в данном случае выглядит как

$$\omega_b = \int_0^\tau \frac{d\tau}{\tau_k},$$

где τ_k зависит от концентрации примесей кислорода и хлора в теплоносителе, толщины стенки сосуда или размера перемычки между отверстиями в перфорированной зоне коллектора первого контура парогенератора.

Циклическая повреждаемость определяется на основе линейного суммирования повреждений

$$\omega_c = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{0i}},$$

где k — количество циклов различных типов; N_i — количество циклов i -го типа с одинаковой амплитудой

дой напряжений, асимметрией цикла и температурой; N_{oi} — количество циклов i -го типа, необходимое для разрушения материала.

Разрушающее число циклов N_{oi} определяется в соответствии с нормами прочности [3]. Поскольку циклическое нагружение носит периодический характер, расчет повреждаемости в данном случае ведется на основе последовательности различных режимов и суммирования повреждений за каждый расчетный полцикл.

Для обнаружения вероятности зарождения трещины в заданной точке конструкции с учетом вероятностного задания значений механических характеристик и концентраций коррозионно-активных примесей в теплоносителе вычисляется n -мерный интеграл по сетке узловых значений случайных параметров вида:

$$P_{Rm} = \int_{X_1} \dots \int_{X_n} Y_r(X_1, X_2, \dots, X_n) \prod_{i=1}^n P(X_i) \prod_{i=1}^n dX_i$$

где $P(X_i)$ — плотности вероятностей распределения значений случайных параметров X_i ; $Y_r = 1$ в случае, если функция повреждаемости при заданных значениях $X_1 \dots X_n$ достигает значения единицы и $Y_r = 0$ в противном случае.

На основе расчетов повреждаемости и плотности вероятности растрескивания материала в узловых точках можно найти плотность вероятности возникновения трещин различного размера, моделируемых как полуэллиптические или как четвертьэллиптические (перфорированная зона коллектора первого контура парогенератора). Возможность соединения трещин учитывается путем корректировки распределения плотности вероятности по длине. Распределение в данном случае строится на интервале большем, чем критический размер сквозного дефекта, а также при наихудшем сочетании прочностных характеристик, воздействующих напряжений и температуры.

Моделирование критического и докритического подрастания трещин

Имеющиеся дефекты развиваются за счет критического и докритического подрастания. Если критический коэффициент интенсивности напряжений на фронте трещины превышен прежде, чем образовалась течь, то происходит интенсивный неконтролируемый рост трещины. Однако это не означает, что произойдет крупномасштабное разрушение конструкции или образуется течь. Этот случай подробно описан на примере хрупкого механизма разрушения в [4]. Возможны следующие варианты: трещина растет в глубину или в длину, рост трещины останавливается (с образованием течи, если проросла на всю толщину стенки, или без нее — в противном случае), или происходит крупномасштабное разрушение. Развитие, в большей степени, определяется коэффициентом интенсивности напряжений, а

точнее, его распределением по фронту трещины. Трещина, растущая по хрупкому механизму разрушения, может остановиться, если ее фронт окажется в области с более вязкими свойствами или низкими напряжениями при их неоднородности по толщине стенки сосуда. В этом случае даже лавинный старт трещины не приведет к возникновению течей. Более подробное описание алгоритма моделирования критического роста трещин дано в [1].

Учет докритического подрастания трещин основан на следующей зависимости:

$$\frac{dx}{dt} = C f_1(\sigma, t) f_2(x),$$

где x — текущий размер трещины; σ — напряжение; t — время.

Коэффициент C и функции f_1, f_2 зависят от механизмов роста трещины (мало- и многоциклового усталости, межкристаллитной коррозии, коррозионного растрескивания под напряжением, коррозионной усталости).

В случае реализации коррозионно-усталостного механизма скорость роста трещины определяется уравнением Париса [5], параметры которого задаются вероятностным образом.

Определение вероятности разрушения с учетом случайного распределения числа трещин

Вероятность начала разрушения (хрупкого, хрупко-вязкого, вязкого) при наличии трещины рассматривается как пересечение случайных событий, при которых трещина принимает размеры в интервале $x_i = x_i + \Delta x$, а критический размер трещины $x_{кр} < x_i$ при заданных условиях нагружения.

Если параметры нагружения, а, следовательно, и критические размеры трещин, определяемые в соответствии с данными о случайных распределениях механических характеристик материалов, зависят от времени, то время делится на интервалы, в пределах которых параметры считаются постоянными.

Вероятность разрушения или разгерметизации конструкции при наличии в ней n трещин вычисляется как пересечение n независимых случайных событий, заключающихся в неразрушении конструкции с одной трещиной. Независимо от принятого расположения все предполагаемые трещины нагружаются наибольшим напряжением. Если размеры конструкции в Q раз отличаются от эталонного объема, то вероятность разрушения этой конструкции рассчитывается как произведение событий, при которых хотя бы один эталонный объем был разрушен.

Определение распределений вероятности критических размеров трещин для разных механизмов разрушения

Вероятность разрушения вычисляется для четырех механизмов разрушения: хрупкого, вязкого, хрупко-

вязкого, докритического. Условием хрупкого разрушения считается превышение коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) K_I соответствующего эффективного критического значения K_{ICEF} . Расчет КИН проходит по методикам, предлагаемым Руководящим документом [5].

При ВАР перфорированной зоны коллектора первого контура парогенератора в вычислении устойчивости трещины, захватывающей несколько перемычек (макротрещины), используется понятие «эффективного» значения критического коэффициента интенсивности напряжений:

$$K_{ICEF} = C_{IC} K_{IC}$$

где K_{IC} — критический коэффициент интенсивности напряжений материала сосуда давления; C_{IC} — коэффициент учета перфорации, определяемый на основе энергетического критерия роста трещины, согласно которому трещина растет, если изменение энергии упругих деформаций, вызванных ее раскрытием, выше, чем изменение поверхностной энергии за счет увеличения ее поверхности.

Считаем, что по сравнению с ростом трещины в сплошной стенке при росте трещины в перфорированной зоне изменение поверхностной энергии меньше и пропорционально изменению площади сечения перфорации внутри ее контура. Это связано с тем, что при увеличении трещины новые поверхности составляют только площадь перемычек между отверстиями.

Критерием хрупко-вязкого разрушения принято условие превышения величиной раскрытия трещины δ ее критического значения $\delta \geq \delta_c$. В программе предусмотрено использование двух видов зависимостей, определяющих связь между величиной раскрытия трещины, уровнем приложенных напряжений и размерами трещин, — для уровня эффективных напряжений ниже 0,5 и выше 0,5 предела текучести [1].

При вязком разрушении может иметь место локальная или общая пластическая неустойчивость. Это определяется изменением свойств материала и размерами трещины. При данном разрушении функция вероятности критических размеров дефектов учитывает геометрию сосудов давления (трубопроводов, цилиндрических или сферических сосудов давления, гибов трубопроводов и сосудов с геометрией тора). Расчет на локальную пластическую неустойчивость проводится с учетом радиуса кривизны объекта в плоскости трещины [6].

Для перечисленных механизмов разрушения все деформационные и прочностные характеристики материала (модуль упругости, пределы прочности, пластичности, и т. д.) задаются вероятностным образом.

Расчет эквивалентного диаметра течи при возникновении сквозных стабильных трещин

Вычислить площадь раскрытия трещин с высокой точностью позволяют методики, основанные на трехмерных расчетах методом конечных элементов (МКЭ)

с использованием диаграмм деформирования материала. Для многих отечественных материалов подобные сертификатные данные отсутствуют, что делает использование указанного метода затруднительным. В методике МАВР-5.1 площадь раскрытия трещин определяется на основе различных аналитических зависимостей, содержащих доступные характеристики материалов и верифицированных на основе расчетов МКЭ. Доказано, что их точность вполне удовлетворительна для использования в инженерных расчетах.

Примеры применения вероятностного анализа разрушения

В качестве примера использования ПК МАВР для формирования данных по частотам исходных событий при ВАБ приведены результаты ВАР перфорированной зоны корпуса коллектора первого контура парогенератора ПГВ-1000. Расчеты проводили для двух вариантов постулированной дефектности материала (таблица).

Параметры логнормального распределения размеров и числа дефектов

Номер дефектности	Параметры распределения		Характерная глубина, мм	Число дефектов 1/м ²
	M	σ		
Глубина дефектов				
1	1,35	0,62	42,8	1,01
2	0,33	0,62	4,00	3,47
Длина дефектов				
1	1,35	2,42	257,5	1,01
2	0,33	2,42	24,00	3,47

На рисунках 1, 2 приведены вероятности образования течи и крупномасштабного разрушения (разрыва) корпуса коллектора первого контура парогенератора при указанных в таблице уровнях дефектности.

Заключение

Результаты ВАР, полученные с использованием методики МАВР, могут быть использованы не только в качестве исходных данных для ВАБ, но и для решения большого спектра инженерных и научных задач:

- оптимальности периодичности контроля состояния оборудования РУ при техническом освидетельствовании (ТО) оборудования РУ;
- эффективности и оптимальности коэффициентов запаса, используемых при детерминистических расчетах на прочность;
- вероятностного подхода к обоснованию концепции безопасности «течь перед разрушением» (ТПР).

Основными проблемами, возникающими при ВАР, являются дефицит, а часто и полное отсутствие исходных данных по статистическим характеристикам физико-механических свойств конструкционных ма-



Рис. 1. Вероятность образования течи разных условных диаметров за 60 лет эксплуатации:

1, 2 — уровни дефектности

териалов. Возможно на первом этапе имеет смысл создание унифицированной базы данных по статистическим характеристикам свойств материалов на основе Приложения 1 норм расчета на прочность [3]. Для этого необходимо уточнить и придать количественное содержание терминам «гарантированность» или «ми-

Литература

1. Александров А.Е., Тюрин А.В., Киселев М.Н. Анализ вероятности разрушения корпуса реактора ВВЭР с использованием эффективной расчетной модели // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов». 2015. Вып. 3. С. 95—109.
2. Алексеев П.В. Расчетное моделирование процессов накопления повреждений коллектора парогенератора ПГВ-1000 в вероятностной постановке: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.
3. ПНАЭ Г-7-002—86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. РД ЭО 0330-01. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК и ВВЭР на стадии эксплуатации. М.: Росэнергоатом, 2001.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
6. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.

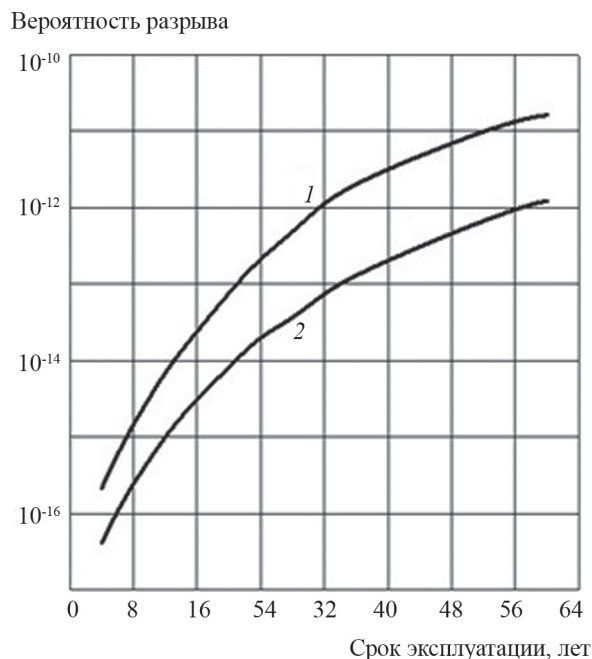


Рис. 2. Зависимость вероятности разрыва от срока эксплуатации:

1, 2 — уровни дефектности

нимальность» в указанном документе. Также следует стандартизировать характеристики выявляемости дефектов материала средствами неразрушающего контроля. Стоит отметить отсутствие нормативной базы ВАР, регламентирующей подходы и требования к методам расчета вероятности разрушения элементов РУ.

References

1. Aleksandrov A.E., Tyurin A.V., Kiselev M.N. Analiz Veroyatnosti Razrusheniya Korpusa Reaktora VVER s Ispol'zovaniem Effektivnoy Raschetnoy Modeli. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Fizika Yadernykh Reaktorov». 2015;3:95—109. (in Russian).
2. Alekseev P.V. Raschetnoe Modelirovanie Protsssov Nakopleniya Povrezhdeniy Kollektora Parogeneratora PGV-1000 v Veroyatnostnoy Postanovke: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NITS «Kurchatovskiy Institut», 2013. (in Russian).
3. PNAE G-7-002—86. Normy Rascheta na Prochnost' Oborudovaniya i Truboprovodov Atomnykh Energeticheskikh Ustanovok. M.: Energoatomizdat, 1989. (in Russian).
4. RD EO 0330-01. Rukovodstvo po Raschetu na Prochnost' Oborudovaniya i Truboprovodov Reaktornykh Ustanovok RBMK i VVER na Stadii Eksploatatsii. M.: Rosenergoatom, 2001. (in Russian).
5. Cherepanov G.P. Mekhanika Khrupkogo Razrusheniya. M.: Nauka, 1974. (in Russian).
6. NP-001-15. Obshchie Polozheniya Obespecheniya Bezopasnosti Atomnykh Stantsiy. (in Russian).

Сведения об авторах:

Тутнов Александр Александрович — доктор технических наук, профессор, начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт»

Лоскутов Олег Дмитриевич — кандидат технических наук, начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт»

Алексеев Петр Викторович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

Тутнова Антонина Васильевна — ведущий технолог НИЦ «Курчатовский институт»

Алексеев Андрей Тарасович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: andtaraleks@gmail.com

Information about authors:

Tutnov Aleksandr A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Head of Dept. of NRC «Kurchatov Institute»

Loskutov Oleg D. — Ph.D. (Techn.), Head of Laboratory of NRC «Kurchatov Institute»

Alekseev Petr V. — Ph.D. (Techn.), Leading Researcher of NRC «Kurchatov Institute»

Tutnova Antonina V. — Leading Technologist of NRC «Kurchatov Institute»

Alekseev Andrey T. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: andtaraleks@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 26.04.2019

The article received to the editor: 26.04.2019