

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

О.Б. Самойлов, А.А. Фальков, О.Н. Морозкин, В.Е. Лукьянов

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ УЧЕТА ОТКЛОНЕНИЙ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИЗ ТВСА ВВЭР-1000

ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»

Рассмотрены вероятностные методики расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, используемые зарубежными фирмами при обосновании теплотехнической надежности активных зон водо-водяных реакторов. Представлена вероятностная методика учета отклонений локальных параметров при обосновании теплотехнической надежности активной зоны ВВЭР-1000, состоящей из ТВС альтернативной конструкции (ТВСА), в режимах нормальной эксплуатации (НЭ) и режимах нарушения нормальной эксплуатации (ННЭ).

Ключевые слова: теплотехническая надежность, коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи, неопределенность параметров, нормальный закон распределения.

Введение

При проектировании и эксплуатации топливных загрузок реакторов ВВЭР-1000 установлены ограничения на нейтронно-физические и теплогидравлические параметры активной зоны реактора в виде проектных пределов (критериев) при нормальной эксплуатации.

Основным критерием теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации является предотвращение кризиса теплоотдачи на поверхности наиболее «горячего» твэла с вероятностью не менее 95% при доверительном уровне 95%. Указанный критерий соответствует основному проектному критерию *NRC* для активных зон ядерных реакторов, принятому в мировой практике для *PWR* [1, 2].

В соответствии с требованиями нормативных документов проверка выполнения проектных пределов проводится в консервативном подходе с учетом:

- отклонения мощности и режимных параметров реактора при эксплуатации от проектных значений;
- технологических отклонений при изготовлении элементов активной зоны;
- методических погрешностей при моделировании нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне реактора;
- отклонений геометрических характеристик активной зоны в процессе эксплуатации;
- погрешности измерений.

В практике обоснования активных зон ВВЭР минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи рассчитывается при наложении предельных отклонений всех определяющих параметров в неблагоприятную сторону. Полученные таким образом значения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи являются консервативной оценкой этой вели-

ны и ограничивают возможность улучшения технико-экономических характеристик топливного цикла, требующего увеличения мощности ТВС и твэлов.

Предлагаемая методика статистически учитывает неопределенности в локальном тепловом потоке, подогреве теплоносителя в ячейках и погрешность расчета критического теплового потока при определении запаса до кризиса теплоотдачи, исходя из обеспечения уровня доверительной вероятности не менее 95%, и позволяет снять излишний консерватизм в оценке минимального значения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

Детерминистский подход

При обосновании теплотехнической надежности активных зон ВВЭР-1000 значения коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи рассчитываются при предельных значениях отклонений всех определяющих параметров в неблагоприятную сторону, включая отклонения в критическом тепловом потоке, обусловленные погрешностью расчета, неопределенности в локальном тепловом потоке и подогреве теплоносителя в ячейке ТВС.

Расчет коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи в ТВСА активных зон ВВЭР-1000 проводится с использованием программ поячейкового теплогидравлического расчета ТВС.

Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи определяется для каждого твэла в ТВС из соотношения

$$K_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}} \cdot (1 - \Delta q_{\text{кр}})}{q_S \cdot K_{\text{инж}}^q}, \quad (1)$$

где $q_{\text{кр}}$ – критический тепловой поток на поверхности твэла, рассчитываемый по локальным параметрам теплоносителя в расчетной ячейке с учетом $K_{\text{инж}}^{\Delta}$; $\Delta q_{\text{кр}}$ – погрешность расчета критического теплового потока на основе обработки большого массива экспериментальных данных, составляет 15%, определяется с доверительной вероятностью не менее 0,95; q_S – локальный тепловой поток; $K_{\text{инж}}^q$ – инженерный коэффициент запаса на тепловой поток с поверхности твэла, учитывающий неопределенности и технологические допуски при изготовлении твэлов, такие как отклонения геометрии оболочек твэлов и топливных таблеток, обогащения и загрузки топлива, осевого зазора в столбе топлива и др., а также погрешности нейтронно-физического расчета полей энерговыделения по кассетам, твэлам в кассете и высоте активной зоны.

При расчете критического теплового потока учитывается возможное отклонение энтальпии теплоносителя в расчетной ячейке от рассчитываемого значения за счет погрешностей расчетных методик и отклонений геометрических характеристик. Учет производится с помощью инженерного коэффициента запаса на локальный подогрев теплоносителя с использованием соотношения

$$\Delta I_{\text{откл}} = \Delta I_{\text{яч}} \cdot K_{\text{инж}}^{\Delta}, \quad (2)$$

где $\Delta I_{\text{откл}}$, $\Delta I_{\text{яч}}$ – значения изменения относительной энтальпии теплоносителя в рассматриваемой ячейке с учетом и без учета инженерного коэффициента запаса на подогрев теплоносителя; $K_{\text{инж}}^{\Delta}$ – инженерный коэффициент запаса на локальный подогрев теплоносителя в ячейке.

Использование вероятностной методики учета отклонений локальных параметров зарубежными фирмами

Вероятностные методики, учитывающие случайный характер отклонений практически всех определяющих параметров, используются за рубежом при обосновании теплотехнической надежности активных зон водо-водяных реакторов [3, 4].

Представление о вероятностных методиках можно получить на примере методики вероятностного учета отклонений параметров – MSG, разработанной фирмой FRAMATOME, в основе которой лежит выделение «вероятностной» составляющей в отклонениях рассматриваемых параметров и ее учет в соответствии с правилами статистики (рис. 1).

Диаграмма (рис. 1, а) отвечает детерминистскому подходу к расчету коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

Предельное проектное значение минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи $DNBR_{DL}$, отвечающее условию отсутствия кризиса теплоотдачи на поверхности твэлов, определяется с учетом погрешности расчета критического теплового потока (17%) и проектного запаса на искривление ТВС ($DP_{RB}=6,1\%$).

В детерминистском подходе фирмы FRAMATOME $DNBR_{DL}=1,25$, причем этот коэффициент не зависит от параметров реакторной установки и является пределом, с которым сравниваются полученные коэффициенты запаса до кризиса теплоотдачи.

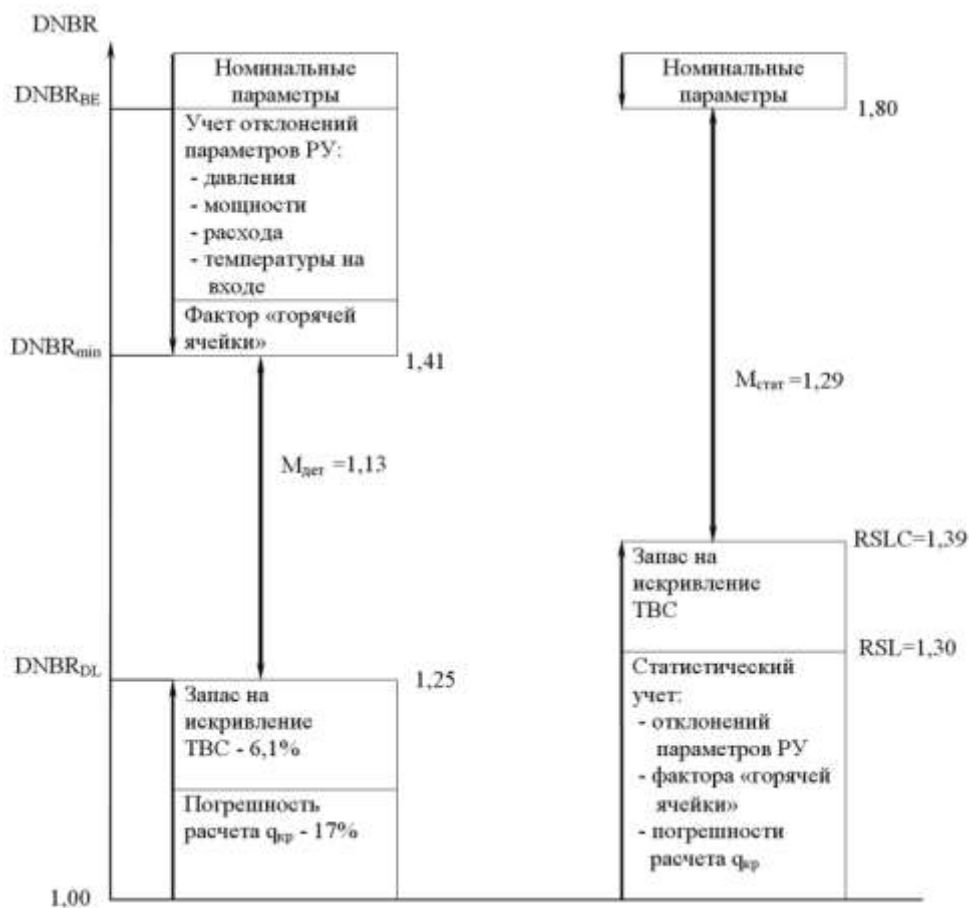


Рис. 1. Детерминистская и статистическая методики расчета коэффициента запаса (FRAMATOME)

а – детерминистский подход; б – статистический подход MSG

Значение минимального коэффициента запаса $DNBR_{min}$ в детерминистском подходе определяется при отклонениях параметров эксплуатации реакторной установки в неблагоприятную сторону, учитывается также фактор «горячей ячейки» – увеличение локального энерговыделения до предельных значений.

Степень теплотехнической надежности активной зоны характеризуется отношением M минимального коэффициента запаса $DNBR_{min}$ к предельному проектному значению $DNBR_{DL}$:

$$M = \frac{DNBR_{\min}}{DNBR_{DL}}. \quad (3)$$

В статистическом подходе (рис. 1, б) определяется $DNBR_{BE}$ – минимальный коэффициент запаса при номинальных параметрах работы реакторной установки без учета отклонений.

Учет неопределенностей параметров реакторной установки (РУ), ядерных и тепловых параметров, параметров изготовления топлива, включая отклонения, накладываемые для «горячей ячейки», проводится статистическим суммированием указанных отклонений. В эту же сумму входит неопределенность теплогидравлического расчета по используемому ячейковому коду FLICA III-F и погрешность корреляции для расчета критического теплового потока. Полученная таким образом величина представляет собой полное среднеквадратичное отклонение (σ_t), на основе которого в соответствии с приведенным далее соотношением определяется статистический предельный проектный запас RSL :

$$\sigma_t = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2}, \quad (4)$$

$$RSL = 1 + 1,645 \cdot \sigma_t. \quad (5)$$

Коэффициент 1,645 отвечает односторонней вероятности исполнения события 95% для нормального закона распределения.

В методике фирмы FRAMATOME используются следующие значения отклонений:

- мощности активной зоны: равномерное распределение $\sigma=1,15\%$;
- давления: равномерное распределение $\sigma=0,121\text{МПа}$;
- расхода: равномерное распределение $\sigma=0,69\%$;
- входной температуры: равномерное распределение $\sigma=1,27^\circ\text{C}$;
- локального теплового потока: нормальное распределение $\sigma=0,0394$;
- локального подогрева: нормальное распределение $\sigma=0,0188$.

Погрешность расчета критического теплового потока для кода FLICA III-F составляет $\Delta q_{\text{кр}}=17\%$ при использовании корреляции WRB-1.

Расчет RSL (без учета искривления ТВС) проводится для восьми состояний, охватывающих полный диапазон изменения параметров РУ (давление, температура, мощность, расход), характерный для НЭ и аварийных режимов, определяющих по условиям охлаждения активной зоны, включая режимы с ростом мощности и уменьшения расхода. Для каждого режима на основе расчетов по ячейковому теплогидравлическому коду FLICA III-F набора 1000 состояний, сформированных методом генерирования случайных чисел типа Монте-Карло, определяется распределение плотности вероятности RSL .

В данном подходе учета отклонений и неопределенностей полное среднеквадратичное отклонение σ_t составляет 18,2%, а предельный проектный запас $RSL=1,30$ [3].

Проектный запас на искривление ТВС учитывается детерминистически:

$$RSLC = \frac{RSL}{1 - DP_{RB}} = 1,39. \quad (6)$$

Коэффициент $RSLC$ представляет собой аналог предельного проектного запаса $DNBR_{DL}$ в детерминистском подходе. Выполнение условия $DNBR_{BE} > RSLC$ обеспечивает отсутствие кризиса теплоотдачи для наиболее горячего твэла с уровнем доверительной вероятности не менее 95%.

В качестве примера рассмотрено определяющее по теплотехническим запасам состояние в режиме с потерей расхода при номинальной мощности и расходе 80% от номинального для типичного трехпетлевого реактора PWR фирмы FRAMATOME мощностью 900 МВт(э).

В статистическом подходе отношение минимального коэффициента запаса $DNBR_{BE}$ к предельному проектному запасу $RSLC$ составляет $M_{\text{стат}}=1,29$, что на 16% выше, чем в детерминистском подходе.

Аналогичный рассмотренному подход применен фирмой WESTINGHOUSE для обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР-1000 АЭС «Темелин» с тепловыделяющими сборками VVANTAGE6.

В основе использования фирмой WESTINGHOUSE вероятностной методики RTDP (Revised Thermal Design Procedure) лежит статистический учет неопределенностей параметров РУ, параметров горячей ячейки, неопределенностей расчета локальных параметров и критического теплового потока [4].

Статистическому учету, согласно методике RTDP, подлежат отклонения входной температуры $\Delta T_{\text{вх}}=1,2^\circ\text{C}$, давления $\Delta P=0,3$ МПа, тепловой мощности активной зоны $\Delta N=4\%$. В отличие от неопределенностей локальных параметров, распределение которых соответствует нормальному закону, для отклонений параметров РУ принимается равномерный закон распределения.

На расход теплоносителя статистический учет не распространяется. Расход теплоносителя через активную зону принимается минимальным.

Обоснование теплотехнической надежности АЭС «Темелин» проводилось с использованием ячейкового кода VIPRE, представляющего трехмерный код с включением уравнений для поперечных потоков теплоносителя и предназначенного для теплогидравлических расчетов как в стационарных, так и в динамических режимах. Погрешность расчета критического теплового потока для кода VIPRE составляет $\Delta q_{\text{кр}}=18,5\%$ при использовании корреляции WX1H (работа реактора на четырех и трех главных циркуляционных насосах (ГЦН)).

Проектный предел $DNBR_{DL}$ в режиме работы на четырех ГЦН, включающий запас на искривление твэлов, составляет $DNBR_{DL}=1,30$.

Усовершенствованная методика учета отклонений локальных параметров при расчете коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи

Расширение вероятностного подхода с учетом случайного характера отклонений параметров дает снижение консерватизма в оценке минимального значения коэффициента запаса, по сравнению с применяемым детерминистским подходом [5].

В методике статистического учета отклонений локальных параметров коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$K_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}} \cdot (1 - \Delta K_{\text{зап}})}{q_S}, \quad (7)$$

где $q_{\text{кр}}$ – критический тепловой поток, рассчитанный при предельных значениях отклонений в неблагоприятную сторону всех определяющих параметров, за исключением отклонения, обусловленного погрешностью расчета $q_{\text{кр}}$, локального подогрева ΔI и отклонения локального теплового потока q_S ; $\Delta K_{\text{зап}}$ – погрешность расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, статистически учитывающая погрешность расчета критического теплового потока, локального подогрева и отклонения локального теплового потока.

При односторонней доверительной вероятности 95% для нормального закона распределения отклонений связь полной погрешности $\Delta K_{\text{зап}}$ со среднеквадратичным отклонением σ дается соотношением

$$\Delta K_{\text{зап}} = 1,645 \cdot \sigma. \quad (8)$$

Следует отметить, что для уровня односторонней доверительной вероятности 95% различные законы распределения, включая равномерное, треугольное, нормальное и др., дают близкие значения неопределенности $\Delta/\sigma \approx (1,60 \pm 0,05)$ [6]. Так что, строгое выполнение нормального закона для рассматриваемых распределений не является обязательным при учете отклонений, соответствующих уровню односторонней доверительной вероятности 95%.

Полное отклонение для коэффициента запаса определяется через отклонения локальных параметров (x_i) при рассмотрении их статистически независимыми:

$$\Delta K_{\text{зап}}(x_1, x_2, \dots, x_i) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2}. \quad (9)$$

В силу того, что отклонения подогрева и локального теплового потока являются зависимыми величинами, связанными с отклонениями мощности твэлов $\Delta N_{\text{ТВ}}$, следует выделить независимую от $\Delta N_{\text{ТВ}}$ часть отклонения локального подогрева $\Delta \tilde{I}$.

В этом случае в качестве статистически независимых составляющих погрешности расчета $K_{\text{зап}}$ рассматриваются следующие [7]:

- корреляции критического теплового потока – $\Delta q_{\text{корр}}$;
- определения линейной нагрузки в части изменения аксиальной неравномерности энерговыделения ΔK_z ;
- определения мощности твэла – $\Delta N_{\text{ТВ}}$;
- независимая от мощности твэла часть отклонения локального подогрева теплоносителя $\Delta \tilde{I}$.

В качестве независимых переменных рассматриваются КТП, аксиальная неравномерность энерговыделения K_z , мощность твэла $N_{\text{ТВ}}$ и независимая часть локального подогрева $\Delta \tilde{I}$, а выражение для расчета погрешности $\Delta K_{\text{зап}}$ принимает вид

$$\Delta K_{\text{зап}}^2 = \left(\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial q_{\text{корр}}} \right)^2 \cdot \Delta q_{\text{корр}}^2 + \left(\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial K_z} \right)^2 \cdot \Delta K_z^2 + \left(\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial \Delta I} \right)^2 \cdot \Delta \tilde{I}^2 + \left(\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial N_{\text{ТВ}}} \right)^2 \cdot \Delta N_{\text{ТВ}}^2. \quad (10)$$

Значения величин $\Delta q_{\text{корр}}$, ΔK_z , $\Delta \tilde{I}$, $\Delta N_{\text{ТВ}}$ принимаются исходя из обеспечения односторонней доверительной вероятности 95%.

При определении неопределенностей ΔK_z и $\Delta N_{\text{ТВ}}$ учитывается связь между ними из соотношения для величины отклонения локального теплового потока:

$$\Delta q_s = \sqrt{\Delta K_z^2 + \Delta N_{\text{ТВ}}^2}. \quad (11)$$

Значения коэффициентов связи $\frac{\partial \Delta I}{\partial N_{\text{ТВ}}}$, $\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial \Delta I}$, неравные 1, 0, меняются в зависимости

от параметров режима работы РУ, для которого определяется запас до кризиса теплоотдачи. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [1, 2] применительно к обоснованию безопасности эксплуатации реакторов типа ВВЭР-1000 с использованием статистических методов коэффициенты связи определяются для стационарных и переходных режимов нормальной эксплуатации, определяющих режимов нарушения нормальной эксплуатации и аварийных режимов с нарушением теплоотвода от активной зоны. Из полученного набора выбираются наихудшие, определяющие максимальную величину $\Delta K_{\text{зап}}$, значения $\frac{\partial \Delta I}{\partial N_{\text{ТВ}}}$, $\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial \Delta I}$.

При определении отклонения $\Delta K_{\text{зап}}$ используются результаты предварительно выполненных расчетов режимов, являющихся определяющими по условиям охлаждения активной зоны.

Из проведенной серии расчетов выбираются состояния, при которых имеет место минимальный коэффициент $K_{\text{зап}}$.

Для набора состояний, диапазон изменения основных параметров (расход, мощность, давление, входная температура) в которых отвечает диапазону изменения определяющих по условиям $K_{\text{зап}}$ параметров теплоносителя в рассматриваемых режимах работы РУ (включая пределы Core Limits), определяются коэффициенты чувствительности и определяется максимальное значение $\Delta K_{\text{зап}}$.

Эффект снижения консерватизма расчета теплотехнического запаса за счет использования уточненного вероятностного подхода

Определение $\Delta K_{\text{зап}}$ проводится для режимов нормальной эксплуатации, определяющих режимов нарушений нормальной эксплуатации и аварийных режимов с нарушениям охлаждения активной зоны, включая обесточивание одного из четырех ГЦН, обесточивание АЭС, заклинивание одного из четырех ГЦН, непреднамеренное извлечение органа средств управления и защиты.

Основные теплогидравлические параметры изменяются в следующих диапазонах:

- мощность - $80\% \leq N_1 \leq 105\%$;
- расход теплоносителя по первому контуру - $64\% \leq G_1 \leq 100\%$;
- давление теплоносителя - $12,7 \text{ МПа} \leq P \leq 16,6 \text{ МПа}$;
- температура на входе в активную зону - $272^\circ\text{C} \leq T_{\text{вх}}^{\text{аз}} \leq 304^\circ\text{C}$.

Анализ результатов расчетов $\Delta K_{\text{зап}}$ в основных режимах нарушений нормальной эксплуатации и проектных авариях, показывает, что максимальное значение отклонения $\Delta K_{\text{зап}}$ имеет место в режиме с заклиниванием одного из четырех ГЦН.

Определенное по уточненной методике значение погрешности расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи $\Delta K_{\text{зап}}$ с использованием принятых отклонений в локальном тепловом потоке и погрешностей определения критического теплового потока [8, 9] и локального подогрева с учетом режимов нарушений нормальной эксплуатации составляет $\Delta K_{\text{зап}}=0,24$.

Выражение для расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи принимает вид:

$$K_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}}}{q_s} \cdot 0,76. \quad (12)$$

Расчет коэффициентов запаса, проведенный для активной зоны из ТВСА 1 блока Калининской АЭС в режиме $100\% N_{\text{ном}}$, показал, что совместный учет вероятностного характера погрешности расчета критических тепловых потоков и отклонений локального теплового потока и локального подогрева приводит к увеличению минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, по сравнению с предельным детерминистским подходом на $\sim 15\%$, и обеспечивает снижение консерватизма при анализе теплотехнической надежности активных зон ВВЭР-1000.

Следует отметить, что величина $\Delta K_{\text{зап}}=0,24$ получена для инженерных коэффициентов запаса для активных зон с ТВС без перемешивающих устройств. При применении в ТВС решеток-интенсификаторов теплообмена погрешность определения локального подогрева уменьшается, по сравнению с ТВС без перемешивающих устройств, за счет того, что возмущение подогрева распространяется на большее число ячеек и величина повышения подогрева в наиболее напряженной ячейке снижается.

Таким образом, для ТВС с перемешивающими решетками можно ожидать некоторого

уменьшения погрешности определения $\Delta K_{\text{зап}}$ и увеличения минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

Статистический учет отклонений путем прямых вычислений

Расчет $\Delta K_{\text{зап}}$ на основе соотношения (10) подтвержден для режима работы на номинальной мощности путем прямого определения распределения плотности вероятности $K_{\text{зап}}$ для набора из $\sim 10^5$ состояний, формируемых путем изменения каждого из рассматриваемых в статистическом подходе параметров в соответствии с распределением вероятности их неопределенностей.

Принят нормальный закон распределения отклонений рассматриваемых параметров. Перебором всех возможных значений (в интервале $\pm 4\sigma$) отклонений параметров определяется распределение коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи, которые могут реализоваться в ТВС при данных параметрах РУ.

Полученное таким образом распределение коэффициента запаса приведено на рис. 2.

Как можно видеть из рис. 2, полученное по методу перебора распределение $K_{\text{зап}}$ относится к классу экспоненциальных распределений (близко к нормальному распределению). Распределение характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_{K_{\text{зап}}} = 0,133$. Уровню односторонней доверительной вероятности 95% соответствует величина отклонения $\Delta K_{\text{зап}} = 0,235$.

Проведенный по методу перебора расчет показал хорошее совпадение значений $\Delta K_{\text{зап}}$ с результатами расчета по соотношению (10).

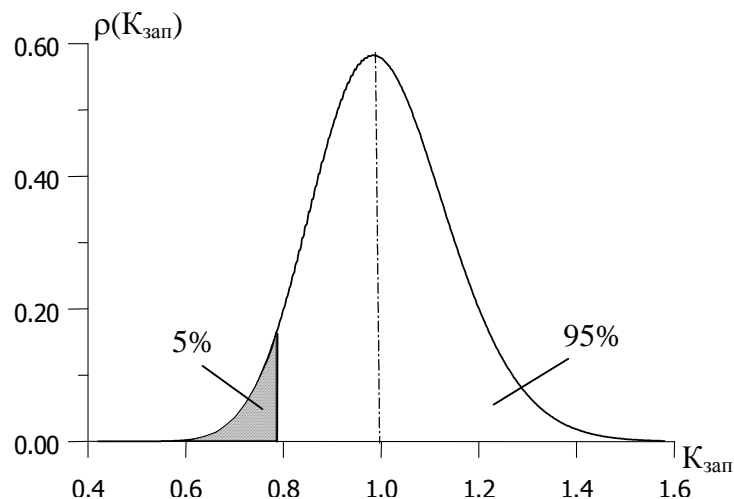


Рис. 2. Распределение относительного значения коэффициента запаса при учете отклонений локальных параметров (метод прямого перебора)

Выводы

Рассмотрены вероятностные методики расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, используемые при расчетах теплотехнической надежности активных зон водоводяных реакторов зарубежными фирмами, которые учитывают вероятностный характер отклонений интегральных и локальных параметров и позволяют исключить консерватизм при определении теплотехнических запасов, по сравнению с детерминистским подходом, на $\sim 16\%$.

Применение усовершенствованной методики расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, обеспечивающей совместный учет случайного характера погрешности расчета критического теплового потока, отклонений локального теплового потока и подогрева теп-

лоносителя, позволяет повысить расчетное значение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи на ~15%, по сравнению с прежним предельным детерминистским подходом, за счет снижения избыточного консерватизма расчета. Это дает возможность реализации на энергоблоках ВВЭР-1000 эффективных топливных циклов с уменьшенной утечкой нейтронов, требующих увеличения допустимых неравномерностей энерговыделения в активной зоне.

На дальнейшей стадии в методике расчета коэффициента запаса целесообразно учесть вероятностный характер отклонений мощности, расхода, давления, входной температуры, исходя из обеспечения уровня доверительной вероятности 95%.

Библиографический список

1. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide No.SSG-2. IAEA. Safety Standards. 2009.
2. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. Safety Reports Series No. 52. IAEA. 2008.
3. J.P. Bourteele, J. Greige, M. Missaglia. The FRAMATOME generalized statistical DNBR method (MSG). Proc. NURETH-6, Grenoble, Oct. 5-8. 1993. Vol. 1. P. 355.
4. S. Ray, A.J. Friedland, E.H. Novendstern, «Westinghouse Advanced Statistical DNB Methodology – The Revised Thermal Design Procedure», Third Int. Topical Meet. On Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, November 1988. Seoul. Korea.
5. **Левин, Е.И.** Предложения по методологии определения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи по тепловому потоку // Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации. – Сосновый Бор: НИТИ, 2000.
6. **Новицкий, П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
7. **Фальков, А.А.** Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик ТВСА ВВЭР-1000 / А.А. Фальков [и др.] // WWER fuel performance, modeling and experimental support: сб. докладов 6-й международной конференции. Albena, Bulgaria, 2005.
8. **Безруков, Ю.А.** Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР / Ю.А. Безруков, В.И. Астахов, В.Г. Брантов / Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 80-82.
9. **Астахов, В.И.** Учет аксиальной неравномерности тепловыделения при определении запасов по кризису теплообмена в реакторах типа ВВЭР / В.И. Астахов, Ю.А. Безруков, С.А. Логвинов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1979. Вып. 5. № 9. С. 161–168.

*Дата поступления
в редакцию 02.11.2010*

O.B. Samoylov, A.A. Falkov, O.N. Morozkin, V.E. Lukyanov

THE REVISION OF THE METHOD TAKING INTO ACCOUNT OF THE DEVIATIONS OF LOCAL PARAMETER FOR SUBSTANTIATION OF RELIABILITY OF CORE VVER-1000 WITH TVSA

The statistical DNBR methods used by foreign companies for substantiation of reliability of the cores cooling are considered. The statistical method taking into account the deviations of local parameters for substantiation of reliability of cooling of the VVER-1000 cores with alternative design fuel assemblies in modes of normal and abnormal operation is presented.

Key words: reliability of the cores cooling, departure from nucleate boiling ratio (DNBR), uncertainty of parameters, normal law of distribution.