

А. М. Абдуллаев¹, А. И. Жуков^{1,2},
С. В. Марёхин¹, С. Д. Рябчиков¹

¹ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина

² Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

Инженерный запас в расчётах энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000

В работе предложена методика расчёта инженерного коэффициента запаса (КЗИ) в расчётах энерговыделения в активной зоне реакторов ВВЭР-1000.

Сделан анализ различных подходов в расчётах КЗИ, определены различные факторы, влияющие на КЗИ, и способы их учёта — детерминистические и статистические. Основное внимание уделено влиянию зазоров между тепловыделяющими сборками (ТВС) на энерговыделение тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) и вкладу этого фактора в КЗИ. Показаны ограниченность и консерватизм двумерных мелко-сеточных расчётов энерговыделения ТВЭлов при отклонении зазоров между тепловыделяющими сборками от проектного.

Предложен трёхмерный подход к расчёту вклада зазоров в КЗИ. В основе подхода лежат:

подробные измерения формы тепловыделяющихборок, выгуженных из активной зоны, выполненные на Запорожской АЭС [13];
моделирование распределения зазоров в активной зоне реактора [16] с использованием данных измерений;

двумерные расчёты энерговыделения ТВЭлов в отдельных тепловыделяющих сборках, окруженных зазорами различной ширины, с условиями зеркального отражения;

трёхмерные расчёты энерговыделения ТВЭлов в тепловыделяющих сборках в активной зоне реактора.

Двумерные и трёхмерные расчёты сделаны известными кодами ALPHA-N/RHOENIX-N/ANC-N. Предложенный подход позволяет учесть не только изменение мощности ТВЭлов, в первую очередь периферийных, что присуще ныне применяющимся методикам расчёта КЗИ, но и учесть изменение мощности тепловыделяющихборок в активной зоне, что делает предложенную методику более реалистичной и снижает избыточный консерватизм расчётов КЗИ и, тем самым, позволяет повысить эффективность использования топлива.

Для ТВС производства компании Вестингауз предложено использовать полные КЗИ: для мощности ТВЭлов ($F_{\Delta H}$) 1.111 и для линейной нагрузки ТВЭлов (F_Q) 1.173. Использование системы мониторинга BEACON™ позволяет дополнительно снизить КЗИ: для мощности ТВЭлов ($F_{\Delta H}$) — до 1.084 и для линейной нагрузки ТВЭлов (F_Q) — до 1.121.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, обеспечение безопасности ВВЭР, инженерный коэффициент запаса, расчётные погрешности параметров энерговыделения.

При проектировании топливных загрузок реакторов типа ВВЭР широко используются инженерные коэффициенты запаса (КЗИ). Методика получения КЗИ, анализ параметров, влияющих на КЗИ, и технология их учета подробно описаны в [1]. Наиболее сложен, на наш взгляд, учет изменения формы ТВС в процессе эксплуатации, главным образом — изменения зазоров между ТВС. При этом возникает ряд вопросов, в частности:

каково распределение зазоров по размерам? Экспериментальные данные, как правило, неполны, термомеханические расчеты дают отдельные состояния, а для статистики необходим ансамбль состояний. Кроме того, результаты расчетов сильно зависят от многих плохо определенных параметров;

как зазоры изменяются во времени? Изменение мощности ТВЭлов зависит от истории выгорания, момента кампании и т. д.;

потвальные расчеты делаются, как правило, для двухмерной ТВС с условиями зеркального отражения или для ТВС с окружением частями ТВС-соседей и при сохранении полной мощности ТВС. Как такие расчеты применять для трехмерной активной зоны (а. з.), учитывая, что зазоры неодинаковы по различным граням ТВС?

Эти и многие другие вопросы обычно решаются использованием консервативного подхода, когда все неопределенности трактуются в худшую сторону. Однако такой подход может привести к неоправданно большому КЗИ и ограничениям на нейтронно-физические параметры проектируемых загрузок.

Для а. з., загруженных топливом компаний «ТВЭЛ» и «Вестингауз», в Научно-техническом комплексе «Ядерный топливный цикл» Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» (НТК ЯТЦ ННЦ «ХФТИ») разработана методика расчета КЗИ, учитывающая отклонения зазоров между ТВС от проектных [2]. Учет основан на случайном распределении зазоров и на потвальных 2D расчетах кодом RHOENIX-N [3]. Расчеты 2D кодом приводят к избыточному консерватизму в оценке КЗИ; для более реальной оценки в настоящей работе определены погрешности, связанные с изменением формы ТВС-WR в 3D модели а. з. При этом проведено сравнение параметров ТВС-WR с максимальным $F_{\Delta H}^1$ для второго года эксплуатации с измененной формой и той же ТВС с проектными межкассетными зазорами. 3D модель а. з. зоны была сгенерирована кодом ANC-N [3] на основе малоутечечной стационарной четырёхгодичной топливной кампании [4] с повышенной мощностью а. з. (107 % номинальной).

Определение инженерных коэффициентов запаса. Нейтронно-физические (НФ) характеристики проектируемой загрузки реактора должны удовлетворять определенным требованиям. Для характеризующих энерговыделение параметров (F_Q^2 , $F_{\Delta H}$, K_q , K_v), которые в условиях нормальной эксплуатации ограничены сверху проектными пределами, такие требования чаще всего имеют форму неравенства

$$x_c \leq x^{\text{lim}}, \quad (1)$$

где x_c и x^{lim} — расчетное значение НФ параметра и его предельное значение, соответственно.

Поскольку НФ параметр рассчитывается с определенной погрешностью, для надежности принимают, что он должен удовлетворять более строгому неравенству

¹ $F_{\Delta H} = K_r$ (в системе ядерного проектирования Росатома).

² $F_Q = K_0$ (в системе ядерного проектирования Росатома).

$$x_c \cdot K_{x,eng} \leq x^{lim}, \quad (2)$$

где $K_{x,eng} > 1$ — КЗИ.

В инженерных расчетах различные $K_{x,eng}$ учитывают кроме погрешности вычислений [1] еще и неопределенности, связанные с технологическими характеристиками топлива, отклонениями геометрических характеристик компонентов а. з. и другими параметрами.

Влияние вышеперечисленных неопределенностей на результаты расчета НФ параметров, характеризующих энерговыделение в а.з., носит случайный характер, т. е. при расчете параметра x активной зоны абсолютная погрешность (разница между истинным и расчетным значениями данного параметра) $\Delta(x)$ и относительная погрешность являющиеся случайными величинами, подчиняющимися соответствующему закону распределения. Этим величинам соответствуют определенные с вероятностью α максимальные погрешности $\Delta_\alpha(x)$, $\Delta_\alpha(x)$.

При этом КЗИ можно представить в виде

$$K_{x,eng} = 1 + \delta_\alpha(x), \quad (3)$$

где $\delta_\alpha(x) = \Delta_\alpha(x)/x$ — максимальная возможная относительная погрешность, обусловленная совокупным влиянием факторов, которые могут исказить результаты расчета.

В соответствии с российской [1] и мировой [5, 6] практикой проектирования топливных загрузок, для используемых КЗИ и определяющих их погрешностей вероятность α должна быть не менее 95 %. При этом для каждого фактора абсолютная погрешность будет соответствовать 95 % квантилю плотности распределения соответствующего отклонения.

При односторонней доверительной вероятности 95 % для нормального закона распределения погрешностей

$$\delta_{\alpha=0,95}(x) = 1,645\sigma(x)/x, \quad (4)$$

где $\sigma(x)$ — среднеквадратическое отклонение параметра x .

В [7] показано, что для односторонней доверительной вероятности 95 % строгое выполнение нормального закона для распределений погрешностей не является обязательным, так как различные законы распределения (равномерное, треугольное, нормальное, часть экспоненциальных и т. п.) дают близкие значения неопределенности

$$\delta_{\alpha=0,95}(x) = 1,6\sigma(x)/x. \quad (5)$$

Если значение погрешности не ограничено сверху и ее распределение близко к нормальному, уровню двусторонней доверительной вероятности порядка 95 % (95,45 %) соответствует равенство

$$\delta_{\alpha=0,95}(x) = 2\sigma(x)/x. \quad (6)$$

Полные КЗИ и их составляющие для мощности твэлов. При проектировании топливных загрузок обычно используется так называемый полный КЗИ K_{eng}^T [1, 2], учитывающий все погрешности, влияющие на конечный результат. Для относительной мощности твэлов K_{eng}^T учитывает:

погрешность измерения и поддержания тепловой мощности реактора;

методические погрешности расчета используемых кодов; влияние технологических (производственных) факторов; влияние эксплуатационных факторов.

Погрешности, входящие в полный КЗИ, разделяются на детерминистические и статистические. Детерминистические погрешности включаются в конечный результат прямым умножением на соответствующий коэффициент запаса, а статистические погрешности учитываются статистическим суммированием.

Погрешности измерения и поддержания тепловой мощности реактора. Точность измерения и поддержания тепловой мощности а. з. описывается коэффициентами $K_p^{meas} = 1,02$ и $K_p^{contr} = 1,02$ [8].

В различных методиках расчета полного КЗИ данные коэффициенты учитываются по-разному. Например, в [1] они входят в полный КЗИ детерминистически, в виде прямого произведения, а в [2] объединяются с остальными погрешностями статистически. В данной работе используется подход, в котором неопределенность измерения тепловой мощности а. з. учитывается статистически ($\delta_p^{meas} = 0,02$), а неопределенность поддержания — детерминистически (с $K_p^{contr} = 1,02$).

Методические погрешности расчета относительной мощности. Методические погрешности характеризуют отклонения расчетных значений какого-либо параметра от истинного при условии, что состав и все характерные размеры рассматриваемой композиции точно известны [1]. Обычно консервативно принимается, что оценка методических погрешностей соответствует отклонениям между расчетными и измеренными данными.

В данной работе для расчетов параметров а. з. используется комплекс АРА-Н [3, 9]. В системе ядерного проектирования «Вестингауз» в качестве методических погрешностей расчета относительной мощности используются так называемые погрешности «измерения»¹ параметров $F_{\Delta H}$ и F_Q ($\delta_{eng}^{means}(F_{\Delta H})$ и $\delta_{eng}^{means}(F_Q)$), которые больше, чем расчетные погрешности модели потвального восстановления мощности в системе кодов АРА-Н.

Помимо указанной погрешности, для F_Q необходимо учесть дополнительный коэффициент запаса $K_{eng}^{grid}(F_Q)$, учитывающий гомогенизацию материала дистанционирующих решеток и замедлителя в коде РНОЕИХ-Н [3].

Технологические погрешности определения относительной мощности. При оценке технологической составляющей полного КЗИ для $F_{\Delta H}$ и F_Q ($\delta_{eng}^{manuf}(F_{\Delta H})$ и $\delta_{eng}^{manuf}(F_Q)$) учитываются допуски на обогащение топлива, плотность топливных таблеток, геометрические размеры таблеток и оболочек, вариации в содержании выгорающего поглопителя.

Эксплуатационные погрешности определения относительной мощности. Для F_Q необходимо учесть еще один детерминистический КЗИ — коэффициент, учитывающий уплотнение топливных таблеток в твэлах $K_{eng}^{dens}(F_Q)$.

В процессе эксплуатации форма ТВС может измениться, что приведет к изменению зазора между ТВС. Поэтому для $F_{\Delta H}$ и F_Q следует учитывать влияние возможных отклонений зазоров между ТВС от проектной величины в процессе эксплуатации топливных загрузок на погрешность расчета относительного энерговыделения в твэлах в а.з.

Возможное увеличение зазора, которое носит вероятностный характер, приводит к увеличению объема замедлителя вблизи соответствующих твэлов и, соответственно,

¹ Поскольку система мониторинга а. з. не может измерять $F_{\Delta H}$ и F_Q непосредственно, то «измеренные» значения данных величин комбинируются из измеренных и расчетных данных с соответствующей погрешностью «измерения».

к увеличению энерговыделения в них. Такое увеличение энерговыделения наиболее заметно для внешних твэлов (особенно для угловых) и в меньшей степени для твэлов второго и третьего (от внешнего) ряда и внутренних (т. е. всех, кроме первых трех рядов и твэгов) твэлов. Данный эффект описывается статистическими КЗИ с соответствующими $\delta_{eng}^{gap,j}(F_{\Delta H})$ и $\delta_{eng}^{gap,j}(F_Q)$ (индекс j означает, что межкассетный зазор влияет на разные топливные стержни по-разному), оценка которых будет проводиться в последующих разделах данной статьи.

Полные КЗИ для определения относительного энерговыделения. Используя определение полного КЗИ и предполагая статистическую независимость входящих в него статистических погрешностей получаем, что полные инженерные коэффициенты запаса для расчета относительного энерговыделения в твэлах с определенным местоположением в ТВС (которое в условиях нормальной эксплуатации ограничено сверху проектным пределом) можно представить в виде

$$K_{eng}^{T,j}(F_{\Delta H}) = K_p^{contr} [1 + 1,645 \sigma_{eng}^{T,j}(F_{\Delta H})/F_{\Delta H}], \quad (7)$$

$$K_{eng}^{T,j}(F_Q) = K_p^{contr} K_{eng}^{dens}(F_Q) K_{eng}^{grid}(F_Q) [1 + 1,645 \sigma_{eng}^{T,j}(F_Q)/F_Q], \quad (8)$$

где

$$\left(\frac{\sigma_{eng}^{T,j}(F_R)}{F_R}\right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_p^{meas}(F_R)}{F_R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{eng}^{meas}(F_R)}{F_R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{eng}^{manuf}(F_R)}{F_R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{eng}^{gap,j}(F_R)}{F_R}\right)^2}, \quad (9)$$

F_R обозначает $F_{\Delta H}$ или F_Q , а индекс j нумерует различные группы твэлов.

Относительные среднеквадратичные отклонения в формулах (7)–(9) связаны с соответствующими относительными погрешностями по формулам (4) и (6).

Значения коэффициентов и параметров, используемых в расчете полных КЗИ для определения относительного энерговыделения в твэлах (кроме учитывающих влияние отклонения зазора между ТВС от проектного), приведены в табл. 1.

Учет влияния отклонения зазора между ТВС от проектного значения на относительную мощность. Учет вклада отклонения зазора между ТВС от проектного в КЗИ проводился на основе 3D оценки относительной мощности различных групп твэлов для одной ТВС-WR кодом ANC-H [3].

Расчеты [2] показали, что наибольшее относительное увеличение мощности твэлов наблюдается для ТВС с наибольшим обогащением и что из всех рассмотренных сценариев образования увеличенного зазора между ТВС наибольшее относительное увеличение мощности было получено в начале второй кампании, при этом в первой кампании зазор был проектным, а с начала второй кампании — максимальным.

Применение 2D расчетов для 3D а.з. приводит к избыточному консерватизму в оценке КЗИ. Далее описана методика расчета КЗИ, учитывающая изменение формы ТВС в 3D модели а. з.

Описание используемой топливной загрузки. 3D модель а. з. сгенерирована кодом ANC-H [3] на основе перспективной малоутечечной стационарной топливной кампании с ТВС-WR [4] с повышенной мощностью а. з.

Таблица 1. Погрешности, используемые в расчетах полных КЗИ

Источник погрешности	$F_{\Delta H}$	F_Q
Точность измерения тепловой мощности а.з. ($\sigma_p^{meas}(F_R)/F_R$)	0,01	0,01
Точность поддержания тепловой мощности а.з. (K_p^{contr})	0,02	0,02
Методические погрешности расчета (погрешности «измерения» $F_{\Delta H}$ и F_Q с использованием комплекса АРА-Н) ($\sigma_{eng}^{meas}(F_R)/F_R$)	0,024	0,030
Наличие дистанционирующих решёток (K_{eng}^{grid})	—	1,025
Влияние производственных факторов ($\sigma_{eng}^{manuf}(F_R)/F_R$)	0,013	0,018
Эффект уплотнения топливных таблеток (K_{eng}^{dens})	—	1,002

(107% номинальной). ТВС-WR отличаются от ТВС-W материалом и конструкцией дистанционирующих решёток (ДР) [10]; в загрузке используется два типа ТВС: 18 — типа 391 WR (среднее обогащение по ^{235}U — 3,91%) и 24 — типа 409 VR (среднее обогащение по ^{235}U — 4,09%).

В соответствии с [2], в качестве референсной была выбрана ТВС 409 VR, которая на начало кампании имела максимальный по а. з. $K_q = 1.321$, максимальный среди кассет второго года эксплуатации $F_{\Delta H} = 1,419$ и наименьшее среди кассет типа 409 VR второго года эксплуатации среднее выгорание 11191 MWD/MTU.

Моделирование изменения формы ТВС. В стандартной ANC-H модели а. з. используются аксиальное разбиение ТВС на 5 зон (псевдовыгораний) и 24 объема (ноды) с расчетом макро- и микросечений при проектном зазоре между ТВС 2 мм (рис. 1, а).

Для учета изменения формы ТВС разбивались на 11 аксиальных зон и 4 ноды. НФ сечения для зон рассчитаны 2D кодом PHOENIX-H, причем водный зазор вокруг аксиальных нод изменялся с высотой: для двух зон-бланкетов задавался проектный зазор, для центральной аксиальной зоны задавался максимальный зазор. Для промежуточных зон величина зазора была распределена по синусу (рис. 1, б).

Определение максимальной ширины зазора. В [11] приведены результаты измерения формы всех 163 ТВС на основе измерения прогибов ТВС на 13 уровнях по высоте после извлечения ТВС из а. з. Такие данные являются наиболее полным источником информации по изменению формы ТВС при работе ВВЭР-1000. Там же предложен метод расчета зазоров между искривленными ТВС, находящимися в а. з. Метод основан на поиске формы ТВС, близкой к форме свободной ТВС (т. е. форме, полученной при измерении), с ограничением не проникать в соседние ТВС (запрет на отрицательные зазоры). По этим данным [11] и характеристикам ТВС [12, 13] в [14] было рассчитано

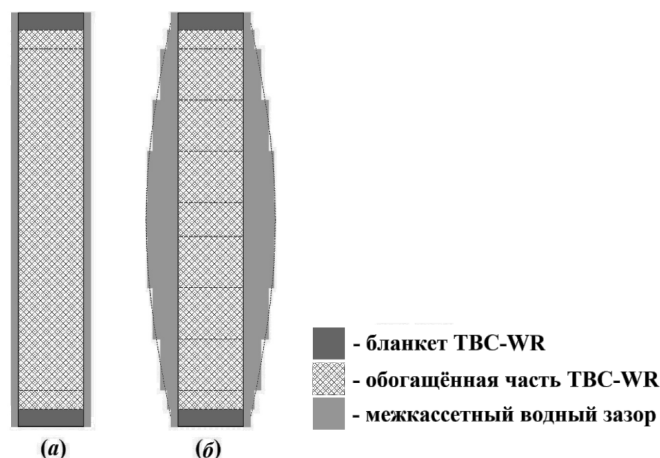


Рис. 1. Стандартная (а) и модифицированная (б) модели TBC-WR

более реалистичное распределение зазоров между ТВС в а. з. с учетом упругих характеристик ТВС— жесткости на изгиб и жесткости на сминание. В результате получено [14], что ширина 95% зазоров между ТВС в а. з. составляет до 7,6 мм; ширина более 95% двойных (смежных) зазоров не превышает 5,6 мм по каждой из смежных граней. В [1] термомеханическими расчетами для ТВСА получены аналогичные величины: 6,2 мм для единичных зазоров и 5,1 мм для каждого из смежных зазоров.

В дальнейших расчетах используются консервативно 7,6 мм и 5,6 мм соответственно.

Результаты 3D оценки КЗИ. Для ТВС-WR выполнено два расчета изменения мощности твэлов: при максимальном зазоре 7,6 мм (все твэлы, кроме углового) и максимальном зазоре 5,6 мм (угловые твэлы).

В расчетах относительной мощности твэлов и (или) твэгов выделены шесть групп твэлов: 1) угловые твэлы (обозначены RA); 2) твэлы первого ряда, кроме угловых (R1); 3) твэлы второго ряда (R2); 4) твэлы третьего ряда (R3); 5) внутренние твэлы — все, кроме первых трех рядов и твэгов (R0); 6) твэги (G).

Расчитанные относительные параметры энерговыделения K_q , $F_{\Delta H}$, F_Q ТВС 409 VR сравнивались с соответствующими величинами, полученными для той же ТВС с проектными зазорами.

Увеличение относительной мощности ТВС при изменении ее формы составляет менее 3%:

$$K_q [\text{расчет с максимальным зазором 7,6 мм}] / K_q [\text{ref}] = 1,026;$$

$$K_q [\text{расчет с максимальным зазором 5,6 мм}] / K_q [\text{ref}] = 1,039.$$

Для оценки изменения относительной мощности ТВС по сравнению с 2D расчетом более представительным будет сравнение коэффициента неравномерности энерговыделения по объему K_v в слое ТВС с максимальным для данной ТВС F_Q с аналогичным референсным. Увеличение K_v в слое ТВС при изменении ее формы составляет менее 4%:

$$K_v [\text{расчет с максимальным зазором 7,6 мм}] / K_v [\text{ref}] = 1,039;$$

$$K_v [\text{расчет с максимальным зазором 5,6 мм}] / K_v [\text{ref}] = 1,026.$$

Оценки относительного увеличения относительной мощности различных групп твэлов ($F_{\Delta H}$) и участков твэлов (F_Q), а именно значения рассчитанных в соответствии с формулой (4) $\sigma_{eng}^{gap,j}(F_R)/F_R$ (где F_R обозначает $F_{\Delta H}$ или F_Q), и соответствующие значения полных инженерных коэффициентов запаса $K_{eng}^{T,j}$ при максимальном зазоре 7,6 мм для всех твэлов кроме угловых и 5, 6 мм для угловых

Таблица 2. Итоговые результаты 3D оценки КЗИ

Тип твэла	$F_{\Delta H}$		F_Q	
	$\sigma_{eng}^{gap,j}(F_{\Delta H})/F_{\Delta H}$	$K_{eng}^{T,j}$	$\sigma_{eng}^{gap,j}(F_Q)/F_Q$	$K_{eng}^{T,j}$
RA	0,037	1,099	0,051	1,156
R1	0,046	1,111	0,063	1,173
R2	0,032	1,093	0,046	1,149
R3	0,017	1,076	0,025	1,124
R0	0,013	1,074	0,020	1,119
G	0,021	1,080	0,030	1,129

твэлов приведены в табл. 2. Для расчета полных инженерных коэффициентов запаса использованы формулы (7)–(9).

Расчет КЗИ при использовании системы мониторинга BEACONTM. В предыдущих разделах описаны оценки КЗИ для проектных расчетов. Непосредственно в процессе эксплуатации топливных загрузок наблюдение за $F_{\Delta H}$ и F_Q осуществляется системой мониторинга а. з. Оценим КЗИ при использовании системы мониторинга а. з. BEACONTM.

В реакторах ВВЭР-1000 для мониторинга распределения мощности в а. з. используются родиевые детекторы прямого заряда (ДПЗ). Система BEACONTM [15] использует измеренные токи ДПЗ для восстановления распределения мощности по а.з. и использует встроенную версию кода ANC-H [3] для поддержания непрерывного обновления 3D модели а. з. в соответствии с фактическими режимами работы блока.

Общая погрешность определения коэффициентов неравномерности энерговыделения помощью BEACONTM определяется следующими ключевыми элементами:

погрешностью измерений ДПЗ;

погрешностью определения распределения мощности по а.з.;

погрешностью расчета НФ характеристик.

Рассмотрим подробнее каждую из этих погрешностей.

Погрешность измерений ДПЗ, которая представляет собой точность измерения локальной мощности, в основном определяется качеством системы датчиков, в том числе эффектом их выгорания. Ее можно оценить, проанализировав большое количество картограмм токов ДПЗ, полученных в ходе работы блока. Погрешностью измерений ДПЗ при этом считается отклонение значения измеренного тока ДПЗ от средней величины для всех значений измеренных токов ДПЗ во множестве симметричных точек. Если датчик не имеет симметричных «партнеров», то используются данные прогнозного расчёта. Такой статистический анализ был проведен в [16, 17]. Данная погрешность не включает в себя каких-либо погрешностей, связанных с прогнозом распределения энерговыделения.

Измерение токов и, тем самым, мощности выполняется только в 64 из 163 ТВС а. з. Для определения энерговыделения в остальной части а. з. данные измерений распространяются на всю а. з. с помощью 3D сплайнов. 3D сплайны системы BEACONTM используют коэффициенты допуска, которые определяются статистикой разброса измерений. 3D распределение мощности по а. з. находят по уравнению

$$P_M(x, y, z) = P_P(x, y, z) \cdot \left[\frac{I_M(i, j, k)}{I_P(i, j, k)} \right], \quad (11)$$

где P_M — измеренное распределение; P_P — предсказанное (расчетное) распределение по текущему состоянию а. з., $[\]$ — 3D сплайн-подгонка; I_M и I_P — измеренный и предсказанный токи ДПЗ; (i, j, k) — местоположение ДПЗ.

Погрешность определения распределения мощности по а. з. исследована аналитически в ходе статистического моделирования: поведение датчиков моделировалось на основе статистики по погрешностям измерений, а система BEACON™ воссоздавала распределение энерговыделения по смоделированным откликам датчиков [16, 17] в широком спектре условий работы реактора.

Для анализа неопределенностей генерировались наборы «истинных» (измеренных) и «предсказанных» (расчетных) пар значений характеристик энерговыделения для нормальных условий эксплуатации и при их нарушениях. Для получения граничных значений погрешности матрица состояний а. з. включала в себя специально заданное рассогласование между такими параметрами «истинных» и «предсказанных» состояний, как как уровень мощности (до 20%), распределение мощности (застывший стержень, ксеноновые колебания и т. д.), выгорание а. з. (до 1000 MWD/MTU) и положение органов регулирования системы управления и защиты (до 26%).

Поскольку функция аппроксимации использует коэффициенты допусков, которые являются функцией погрешности измерения отдельных ДПЗ, качество аппроксимации будет зависеть от этих погрешностей. Кроме того, существуют вариации в количестве работоспособных ДПЗ, которые также влияют на качество аппроксимации. В конечном итоге, погрешность определения измеренных коэффициентов неравномерности энерговыделения является независимой от конкретной топливной кампании функцией погрешности измерения ДПЗ и количества ДПЗ, пригодных для использования.

Для определения суммарной погрешности определения распределения энерговыделения в системе BEACON™ следует включить составляющую, отражающую погрешность методологии, применяемой в кодах RHOENIX-H/ANC-H. Эта составляющая включает в себя погрешность определения отношения мощности к току ДПЗ и погрешность реконструкции энерговыделения в наиболее теплонапряженном твэле. Данные компоненты считаются статистически независимыми друг от друга, их можно свертывать. Полученное значение является погрешностью, связанной с расчетным кодом, и должно быть статистически суммировано с погрешностями определения коэффициентов неравномерности энерговыделения статистическим моделированием.

Погрешности определения коэффициентов неравномерности энерговыделения системой BEACON™ в виде функций от погрешности измерений ДПЗ и процента неработоспособных датчиков приведены в [16]. Для погрешности измерений ДПЗ на уровне 3% верхний 95/95¹ предел погрешностей определения коэффициентов неравномерности распределения энерговыделения составляет 3,4% для $F_{\Delta H}$ и 5,1% для F_Q , соответственно, при типичных условиях, т. е. когда работоспособными являются 90% ДПЗ. При уменьшении количества работоспособных ДПЗ до 50% пределы увеличиваются до 3,8% и 6,2%, соответственно.

¹ Обеспечение выполнения ограничения с вероятностью 95%, при надежности также 95%

Согласно формуле (4), данные значения соответствуют $\sigma_{eng, F_{\Delta H}}^{meas} / F_{\Delta H} = 0,021$ или 0,023 и $\sigma_{eng, F_Q}^{meas} / F_Q = 0,031$ или 0,038 для погрешности измерений ДПЗ на уровне 3% и количестве работоспособных ДПЗ 90% или 50%. Погрешности определения коэффициентов неравномерности энерговыделения системой BEACON™ рассчитаны для широкого диапазона возможных рассогласований между параметрами «истинных» и «предсказанных» состояний а. з. и уже включают в себя разницу между «истинной» и «предсказанной» тепловой мощностью а. з. [17]. Соответственно, при использовании системы BEACON™ в полных инженерных КЗИ нет необходимости дополнительно учитывать точности измерения и поддержания тепловой мощности а. з. Кроме того, в программное обеспечение системы BEACON введены параметры, учитывающие влияние производственных факторов, наличие ДР и эффекта уплотнения топливных таблеток, которые автоматически применяются при восстановлении распределения мощности в а. з. с использованием измеренных токов ДПЗ [15].

С учетом сказанного, полные КЗИ запаса для энерговыделения в твэлах с определенным местоположением в ТВС при использовании системы BEACON™ можно рассчитать по формуле

$$K_{eng}^{T,j}(F_R) = 1 + 1,645 \sigma_{eng}^{T,j}(F_R) / F_R, \quad (12)$$

где F_R обозначает $F_{\Delta H}$ или F_Q ;

$$\sigma_{eng}^{T,j}(F_R) / F_R = \sqrt{(\sigma_{eng}^{meas}(F_R) / F_R)^2 + (\sigma_{eng}^{gap,j}(F_R) / F_R)^2}. \quad (13)$$

Итоговые оценки полных КЗИ $K_{eng}^{T,j}$ для различных групп твэлов ($F_{\Delta H}$) и участков твэлов (F_Q) при использовании системы BEACON™ приведены в табл. 3. Для расчета полных инженерных коэффициентов запаса использованы формулы (12) и (13).

Таблица 3. Итоговые 3D оценки полных инженерных коэффициентов запаса $K_{eng}^{T,j}$ *

Тип твэла	$K_{eng}^{T,j}$ для $F_{\Delta H}$		$K_{eng}^{T,j}$ для F_Q	
	(1)	(2)	(1)	(2)
RA	1,069	1,071	1,098	1,105
R1	1,083	1,084	1,116	1,121
R2	1,063	1,065	1,091	1,098
R3	1,044	1,047	1,066	1,074
R0	1,041	1,044	1,060	1,070
G	1,048	1,051	1,071	1,079

*Значения приведены для погрешности измерений ДПЗ на уровне 3% и количестве работоспособных ДПЗ 90% (1) и 50% (2).

Таким образом, при учете данных системы BEACON™ полные КЗИ снижаются для $F_{\Delta H}$ на величину (2,6...3,0%) или (2,4...2,7%) и для F_Q на величину (4,9...5,2%) или (4,4...4,5%), при погрешности измерений ДПЗ на уровне 3% и количестве работоспособных ДПЗ 90% или 50%.

Выводы

Для ТВС производства компании «Вестингауз» определены КЗИ, учитывающие влияние отклонения зазора между ТВС от проектного на энерговыделение в различных группах твэлов. Проведенные расчёты использовали между искривленными ТВС, полученную из рассчитанного распределения зазоров между ТВС [14], основанного на измерениях прогибов всех 163 ТВС на 13 уровнях по высоте после извлечения ТВС из а. з. [11]. Оценка относительного энерговыделения различных групп твэлов для одной ТВС-WR проводилась 3D кодом ANC-H [3].

3D расчет КЗИ для энерговыделения в твэлах с учетом влияния зазоров между ТВС демонстрирует возможность уменьшения излишнего консерватизма в определении полных КЗИ для энерговыделения в твэлах и (или) твэгах при обоснованном снижении величины максимального возможного зазора между ТВС.

Использование системы мониторинга а. з. BEACON™ позволяет добиться дополнительного снижения полных КЗИ.

Предложенная 3D методика расчета полных КЗИ дает возможность исключить избыточный консерватизм и повысить эффективность использования топлива.

Список использованной литературы

1. Лизоркин М. П., Шихов Л. К. Инженерные коэффициенты запаса при проектировании топливных загрузок ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2016. Вып. 3. С. 68–89.
2. Методика обоснования допустимого уровня мощности РУ и определения допустимых коэффициентов неравномерности объемного и относительного линейного энерговыделения с учетом влияния межкассетных зазоров в активной зоне с ТВС-W : Отчет НТК ЯТЦ ННЦ «ХФТИ» № 12-3-203. Ред. 2. 2013.
3. Квалификация системы расчетных программ PHOENIX-H/ANC-H для проектирования активной зоны с ТВСА : Отчет НТК ЯТЦ ННЦ «ХФТИ» № 12-3-036. Ред.1. 2009.
4. Riabchukov, S.D. (2017), “Preliminary Core Design for SUNPP-3 Power Uprate: CRCD Calculation Note № CN-LRCD-141. Rev.0”.
5. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. Vienna, IAEA, Specific Safety Guide No. SSG-2, 2009. 62 p.
6. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. Vienna, IAEA, Safety Reports Series No. 52, 2008. 199 p.
7. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : «Энергоатомиздат», 1991. С. 83–84.
8. Отчет по анализу безопасности. Техническое обоснование безопасности. Блок № 5 Запорожская АЭС. 21.5.70.ОБ.05.05-06. Кн. 13 / ОАО ХИ «Энергопроект», 2003.
9. Методология и верификация расчетных программ. WEC-UNFQP-004(T). — ред. 1. : ПКЯТУ. 2003.
10. Технические условия на упрочненную ТВС компании «Вестингауз» для реактора ВВЭР-1000. — WEC-RWFA-001(T). Ред. 3. 2014.
11. Обоснование допустимого уровня мощности и объемных коэффициентов неравномерности энерговыделения $K_{в,доп}$ энергоблоков ЗАЭС на основании результатов измерений формоизменения тепловыделяющей сборки альтернативной (ТВСА) : Отчет ЗАЭС и ООО «Тензор» 00.ТН.ЗП.ОТ.342. Приложения 1–4. 2012.
12. Сборка тепловыделяющая альтернативная. Расчет на прочность и формоизменение. ЮТАЯ.506212.001PP1 : Отчет ОКБМ. 2004.
13. Robust Westinghouse fuel assembly mechanical test report. WEC-RWFA-003. Rev.1. 2015.

14. Образование зазоров между ТВС в активной зоне ВВЭР-1000 : Отчет НТК ЯТЦ ННЦ «ХФТИ» № 12-3-436. Ред. 0. 2017.

15. BEACON User Manual : Westinghouse Electric Company. 2006.

16. Morita, T. “Power Distribution Monitoring by BEACON Operational Core Support Systems for South Ukraine Unit 3 Plant”. PCT-04–534 : Westinghouse Electric Company. 2004.

17. Core Monitoring Uncertainties for the Westinghouse BEACON™ Core Monitoring System at the Zaporizhyya Unit 5 Nuclear Power Plant. Westinghouse Topical Report NF-EA-16-007. 2016 (Attachment 1, *William A. Boyd*, “ZNPP5 BEACON-TSM Detector Variability and Uncertainty Verification Report”. 2016).

References

1. Lizorkin M.P., Shishkov L.K. (2016), “Margin Factors in the Design of VVER Fuel Cycles” [“Inzhenernyye koeffitsiyenty zapasa pri proyektirovanii toplivnykh zagruzok VVER”], *Problems of Atomic Science and Engineering. Physics of Nuclear Reactors*, Issue 3, pp. 68–89. (Rus)
2. “The method of substantiating the permissible power level of the reactor and determining the admissible coefficients for the nonuniformity of volumetric and relative linear energy release, taking into account the influence of gaps between fuel assemblies in the core with Westinghouse fuel assemblies” [“Metodika obosnovaniya dopustimogo urovnya moshchnosti RU i opredeleniya dopustimykh koeffitsiyentov neravnomernosti ob'yomnogo i otnositel'nogo lineynogo energovydeleniya s uchotom vliyaniya mezhkassetnykh zazorov v aktivnoy zone s TVS-W”]. Report NFC STE NSC “KIPT” — № 12-3-203. — Rev. 1. — 2013. (Rus)
3. “Qualification of the PHOENIX-H / ANC-H software for the design of core with TVSA” [“Kvalifikatsiya sistemy raschetnykh programm PHOENIX-H/AND-H dlya proyektirovaniya aktivnoy zony s TVSA”]. Report NFC STE NSC “KIPT” — № 12-3-036. — Rev.1. — 2009. (Rus)
4. Riabchykov S.D. (2016), “Prospective four-year fuel cycles with TVS-WR with reduced radial neutron leakage” [“Perspektivnyye chetyrokhgodichnyye toplivnyye tsikly s TBC-WR s umen'shennoy radial'noy utechkoy neytronov”]. Report at V International Conference “Safety and Efficiency of Nuclear Energetics” Odessa, OPU, 06-09.09.2016.
5. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide No. SSG-2. IAEA. Safety Standards. 2009. 62 p.
6. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. Safety Reports Series No. 52. IAEA. 2008. 199 p.
7. Novitsky, P.V., Zograf, I.A. (1991), “Estimation of errors in measurement results” [“Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy”]. 2nd edition, Revised and enlarged. — Leningrad: Energoatomizdat Publishing House. — Leningrad Branch. pp. 83–84. (Rus)
8. “Safety analysis report. Technical substantiation of safety. Unit number 5 Zaporizhyya NPP. 21.5.70.OB.05.05-06. Book 13. JSC HI “Energoproekt” [“Otchet po analizu bezopasnosti. Tekhnicheskoye obosnovaniye bezopasnosti. Blok № 5 Zaporozhskaya AES. 21.5.70. OB.05.05–06. Kniga 13. ОАО ХИ «Энергопроект»”]. — 2003. (Rus)
9. WEC-UNFQP-004. Code Methodology and Verification, Rev. 1, February 2003. (Rus)
10. WEC-RWFA-001. “Technical Specification for Robust Westinghouse Fuel Assemblies for VVER-1000 Reactor”. Rev. 2, February 2014. (Rus)
11. “Substantiation of the permissible power level and volumetric peaking factors K_{v-lim} of the ZNPP Units on the basis of the results of measurements of the shape change of the fuel assembly alternative (TVSA)” [“Obosnovaniye dopustimogo urovnya moshchnosti i ob'yomnykh koeffitsiyentov neravnomernosti energovydeleniya Kvdop energoblokov ZAES na osnovanii rezul'tatov izmereniy formoizmeneniya teplovydelyayushchey sborki al'ternativnoy (TVSA)”]. Report of ZNPP and LLC “Tenzor” 00.TN.ZPOT.342. — Apps 1-4. — 2012. (Rus)

12. "Fuel assembly alternative. Calculation of strength and shape change." ["Sborka teplovydelyayushchaya al'ternativnaya. Raschot na prochnost' i formoizmeneniye."]. OKBM Report UTAYA.506212.001RR1. — 2004. (Rus)

13. WEC-RWFA-003. "Robust Westinghouse fuel assembly mechanical test report", Rev.1, September 2015.

14. "The formation of gaps between fuel assemblies in the VVER-1000 core" ["Obrazovaniye zazorov mezhdru TVS v aktivnoy zone VVER-1000"]. Report NFC STE NSC "KIPT" — № 12-3-436. — Rev.0. — 2017. (Rus)

15. BEACON User Manual, Westinghouse Electric Company. 2006.

16. Morita, T. (2004) "Power Distribution Monitoring by BEACON Operational Core Support Systems for South Ukraine Unit 3 Plant". PCT-04-534.

17. Core Monitoring Uncertainties for the Westinghouse BEACON™ Core Monitoring System at the Zaporizhya Unit 5 Nuclear Power Plant. Westinghouse Topical Report NF-EA-16-007. — 2016 (Attachment 1, William A. Boyd, "ZNPP5 BEACON-TSM Detector Variability and Uncertainty Verification Report". — 2016).

А. М. Абдуллаев¹, О. І. Жуков^{1,2}, С. В. Марьохін¹, С. Д. Рябчиков¹

¹ Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний Інститут», м. Харків, Україна

² Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна

Інженерний запас в розрахунках енерговиділення в активній зоні ВВЕР-1000

В роботі запропонована методика розрахунку інженерного коефіцієнта запасу (КЗІ) в розрахунках енерговиділення в активній зоні реакторів ВВЕР-1000.

Зроблено аналіз різних підходів в розрахунках КЗІ, визначені різні фактори, що впливають на КЗІ, та способи їх врахування — детерміністичні та статистичні. Основну увагу приділено впливу зазорів між тепловиділяючими збірками (ТВЗ) на енерговиділення тепловиділяючих елементів (твелів) і вкладу цього фактора в КЗІ. Показані обмеженість і консерватизм двовимірних дрібносіткових розрахунків енерговиділення твелів при відхиленні зазорів між тепловиділяючими збірками від проектного.

Запропоновано тривимірний підхід до розрахунку вкладу зазорів в КЗІ. В основі підходу лежать:

детальні вимірювання форми тепловиділяючих збірок, вивантажених з активної зони, виконані на Запорізькій АЕС [13];

моделювання розподілу зазорів в активній зоні реактора [16] з використанням даних вимірювань;

двовимірні розрахунки енерговиділення твелів в окремих тепловиділяючих збірках, оточених зазорами різної ширини, з умовами дзеркального відображення;

тривимірні розрахунки енерговиділення твелів в тепловиділяючих збірках в активній зоні реактора.

Двовимірні та тривимірні розрахунки зроблені відомими кодами ALPHA-H / PHOENIX-H / ANC-H. Запропонований підхід дозволяє врахувати не тільки зміну потужності твелів, в першу чергу периферійних, що притаманне методикам розрахунку КЗІ, які нині застосовуються, а й врахувати зміну потужності тепловиділяючих збірок в активній зоні, що робить запропоновану методику більш реалістичною і знімає надмірний консерватизм розрахунків КЗІ та, тим самим, дозволяє підвищити ефективність використання палива.

Для ТВЗ виробництва компанії Вестінгауз запропоновано використовувати повні КЗІ: для потужності твелів ($F_{\Delta H}$) 1.111 і для лінійного навантаження твелів (F_Q) 1.173. Використання системи моніторингу BEACON™ дозволяє додатково знизити КЗІ: для потужності твелів ($F_{\Delta H}$) — до 1.084 і для лінійного навантаження твелів (F_Q) — до 1.121.

Ключові слова: ВВЕР-1000, забезпечення безпеки ВВЕР, інженерний коефіцієнт запасу, розрахункові похибки параметрів енерговиділення.

A. Abdullayev¹, A. Zhukov^{1,2}, S. Maryokhin¹, S. Riabchykov¹

¹ National Science Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv, Ukraine

² V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Engineering Margin in Calculations of Energy Release in VVER-1000 Core

A method for calculating the engineering margin factor (EMF) in calculations of the energy release in the core of VVER-1000 reactors is proposed in the paper.

The analysis of various approaches in the calculation of EMF is carried out and various factors influencing EMF and the ways of their consideration — deterministic and statistical — are determined. The main attention is paid to the influence of gaps between the fuel assemblies on the energy release of fuel rods and the contribution of this factor to the EMF. The limitations and conservatism of two-dimensional small-scale calculations of the energy release of fuel rods in case of deviation of the gap size between the fuel assemblies from the design one are shown.

A three-dimensional approach to calculating the contribution of gaps to the EMF is proposed. The approach is based on

detailed measurements of the shape of fuel assemblies removed from the core performed at Zaporizhzhya NPP [13];

simulation of the distribution of gaps in the reactor core [16] using measurement data;

two-dimensional calculations of the energy release of fuel rods in separate fuel assemblies, surrounded by gaps of different widths, with mirroring boundary conditions;

three-dimensional calculations of energy release of fuel rods in fuel assemblies in the reactor core.

Two-dimensional and three-dimensional calculations are performed by the well-known ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H codes. The proposed approach allows considering not only the change in the fuel rod power, particularly of the peripheral rods, which is inherent in the currently used methods of calculating EMF, but also takes into account the change in the power of the fuel assemblies in the core, which makes the proposed method more realistic and removes the excessive conservatism of EMF calculations and, thereby, allows improving fuel efficiency.

For fuel assemblies produced by Westinghouse, it is proposed to use full EMF: for fuel rod power ($F_{\Delta H}$) 1.111 and for fuel rod linear power (F_Q) 1.173. The use of the BEACON™ monitoring system makes it possible to further reduce the EMF: for fuel rod power ($F_{\Delta H}$) up to 1.084 and for fuel rod linear power (F_Q) up to 1.121.

Keywords: VVER-1000, VVER safety, engineering margin factor, calculated uncertainties of energy release parameters.

Получено 20.04.2018.