

# ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА ТВЭЛОВ ТВС НА ОЦЕНКУ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АКТИВНОЙ ЗОНЫ БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА

**Б.Б. Тихомиров, В.М. Поплавский**

*ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского».*

*249033, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*



Применительно к быстрым натриевым реакторам проанализированы различные модели пучка твэлов, используемые при расчетах температуры теплоносителя и оболочки топливных элементов внутри ТВС. Отмечены недостатки существующих моделей. Предложена модель пучка, основанная на экспериментальном исследовании реального размещения твэлов внутри чехла ТВС. Показаны ее возможности и преимущества перед консервативными моделями исходя из необходимости повышения достоверности оценки рабочей температуры оболочек твэлов.

**Ключевые слова:** реакторы типа БН, тепловыделяющая сборка, модели пучка твэлов, расчет температуры оболочки, модель с учетом статистики, межканальный обмен.

## ВВЕДЕНИЕ

Теплогидравлический режим работы активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН) проектируется так, чтобы температура оболочки наиболее напряженных тепловыделяющих элементов (твэлов) в процессе эксплуатации не превышала заданной проектной величины. Эта величина обусловлена и определяется прочностными свойствами используемого для оболочки материала.

Весьма часто стремление улучшить термодинамические характеристики разрабатываемых проектов энергоблоков с быстрыми натриевыми реакторами приводит к повышению температуры теплоносителя на выходе из активной зоны (АЗ), а следовательно, к увеличению рабочей температуры оболочки твэлов. При этом, как правило, рассматриваемые температурные режимы энергоблока связаны с достижением допустимых температурных пределов работоспособности выбранных материалов.

В связи с этим становится весьма актуальной задача оптимизации расчетных методов определения температуры теплоносителя и оболочки твэла для повышения достоверности получаемых результатов.

Обычно детальный тепловой расчет проводится для наиболее напряженных ТВС активной зоны и боковой зоны воспроизводства. Внутри ТВС АЗ наиболее высокую температуру имеет основная масса топливных элементов центральной области.

В инженерной практике максимальная температура на внутренней поверхности оболочки твэла  $t_{об}^{max}$  может быть найдена как суперпозиция температуры теплоносителя на входе в реактор  $t_{вх}$  среднего по окружающим твэл каналам подогрева теплоносителя

© **Б.Б. Тихомиров, В.М. Поплавский, 2014**

ля  $\Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}}$  на длине АЗ (с учетом нижнего торцевого экрана) в наиболее энергонапряженном участке ТВС, температурных перепадов на границе с оболочкой  $\Delta t_a$ , по периметру  $\Delta t_j$  и толщине оболочки  $\Delta t_{\text{об}}$ , а также возможного увеличения температуры  $\delta t_{\text{фп}}$  за счет случайных отклонений определяющих параметров от номинальных значений:

$$t_{\text{об}}^{\text{max}} = t_{\text{вх}} + \Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}} + \Delta t_a + \Delta t_j + \Delta t_{\text{об}} + \delta t_{\text{фп}}. \quad (1)$$

Температурные разности, входящие в выражение (1), представляют собой функции большого числа конструкционных и эксплуатационных параметров данной ТВС и АЗ в целом. Истинные значения каждого из этих параметров в условиях реактора точно не известны. Заданы лишь их номинальные значения  $x_{\text{н}}$  и возможные максимальные отклонения  $\pm \delta x$  от номинальных значений. В практике тепловых расчетов реакторов отклонения параметров принято характеризовать коэффициентами, называемыми факторами перегрева. Фактор перегрева  $F_j$  – это случайная величина, характеризующая максимальное относительное отклонение параметра  $x_j$ , определяющего температуру или перепад, от номинального значения:  $F_j = \delta x_j / x_{\text{н}}$ . Отклонения от своих номинальных значений всех случайных компонентов выражения (1) суммируются, обуславливая общий перегрев оболочки твэла  $\delta t_{\text{фп}}$ .

В реакторах БН температура теплоносителя играет определяющую роль в формировании температурного поля оболочек твэлов. Термические перепады от теплоносителя до внутренней поверхности оболочки малы по сравнению с подогревом натрия по длине АЗ (230 – 250 °С) и в сумме не превышают 30 – 40 °С. В то же время именно вычисление наибольшего номинального подогрева  $\Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}}$  внутри ТВС, а также оценка величины его возможного отклонения  $\delta(\Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}})$  от номинала под влиянием случайных причин наиболее неоднозначны и вносят основную неопределенность в величину общей погрешности вычисления температуры оболочки, представленной выражением (1).

Действительно, номинальный среднесмешанный подогрев натрия в топливной сборке легко вычисляется исходя из заданных значений мощности ТВС и расхода через нее. Однако распределение локальных расходов и, соответственно, подогревов в каналах по сечению пучка твэлов полностью зависит от того, как эти твэлы размещаются внутри чехла ТВС. Исследованию этой проблемы и посвящена данная работа.

## РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ПУЧКА ТВЭЛОВ

Как правило, тепловыделяющие сборки быстрых реакторов конструктивно выполнены в виде шестигранного чехла с приваренными по концам хвостовиком и головкой. Твэлы закреплены в нижней части чехла и располагаются внутри по треугольной решетке. Дистанционирование твэлов между собой чаще всего осуществляется круглой проволокой, по спирали навитой на оболочку.

В любой ТВС имеет место гарантированный технологический (так называемый теоретический сборочный) зазор  $2\delta_1$  между плотно сжатым пучком топливных элементов и противоположными стенками чехла. Его минимальная величина может быть оценена с учетом суммы плюсовых допусков оболочек твэлов в размере сжатого пучка и минусового допуска на внутренний размер чехла. Указанный зазор необходим для обеспечения собираемости ТВС.

Для более равномерного распределения температуры по периметру оболочки твэлов, прилегающих к чехлу, в пристенные каналы могут быть помещены вытеснители в виде круглой проволоки. С этой же целью для дистанционирования периферийных твэлов вместо круглой проволоки используется эллиптическая лента половинной толщины, позволяющая уменьшить размер пристенных каналов.

При теплогидравлических расчетах ТВС требуется знание величины проходных се-

чений каналов, окружающих топливные элементы. Наличие сборочного зазора вносит неопределенность в расчетную внутрикассетную геометрию пучка.

При проектировании быстрых реакторов используются различные гипотезы относительно размещения твэлов в чехле ТВС в пределах допустимых смещений топливных элементов, в той или иной мере отражающие возможную реальность и меняющиеся в зависимости от степени проработанности проекта и уровня оптимизации теплотехнических параметров реактора:

– модель раздвинутого пучка – пристенные твэлы касаются чехла дистанционирующей лентой, все остальные равномерно размещены по сечению в узлах правильной треугольной решетки, образуя расчетные каналы номинальной площадью  $\Omega_p$  [1, 2];

– модель распределенных зазоров, в которой сборочный зазор (начиная от стенок чехла) равномерно распределяется по сечению пучка, твэлы стоят в узлах правильной треугольной решетки; расчетная номинальная площадь каналов  $\Omega_p$  немного меньше предыдущей [3, 4];

– модель сжатого пучка с соосным размещением по всей длине чехловой трубы пучка твэлов, плотно сжатых до соприкосновения дистанционирующей проволоки с оболочкой соседнего элемента; каналы имеют минимально возможную площадь  $\Omega_p^{\min}$  в качестве расчетной [5, 6];

– модель с переменными по высоте зазорами, в которой предполагается, что в нижней части твэлов до начала АЗ реализован пучок с распределенными зазорами, а на длине АЗ за счет теплового прогиба твэлов происходит постепенное уменьшение среднего шага до образования плотно сжатого пучка в верхней плоскости АЗ. При этом в пучке сохраняется правильная треугольная решетка стержней, обеспечивающая каналы одинакового размера в любом поперечном сечении ТВС.

В связи с тем, что изменение размеров каналов вдоль АЗ очень мало (0,6 % на длине 10 см), а в поперечных сечениях ТВС каналы идентичны, в пучке отсутствует осевой межканальный тепло-массообмен. Пучок становится практически равнозначным плотно сжатому пучку, и в представленной работе не рассматривается.

В предположении изолированности каналов (что идет в запас расчета) при неизменном среднем подогреве теплоносителя в ТВС ( $\Delta t_{\text{ТВС}}^{\text{с}}$ ) в табл. 1 (столбцы 1 – 3) приведены результаты оценки величины номинального подогрева теплоносителя  $\Delta t_{\text{ТН}}^{\text{н}}$  в треугольных каналах ТВС типа БН-800 для упомянутых моделей пучка.

Таблица 1

**Оценка номинального подогрева теплоносителя в ТВС реактора типа БН-800 при использовании различных моделей пучка твэлов**

	Модель пучка			
	1	2	3	4
	Раздвинутый	Распределенные зазоры	Сжатый	Статистический
$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	354			
$\Delta t_{\text{ТВС}}^{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	232			
$\Delta t_{\text{ТН}}, ^\circ\text{C}$	246	252	283	266
$\Delta t_{\text{ТН}} / \Delta t_{\text{ТВС}}^{\text{с}}$	1,06	1,086	1,22	1,146

Как следует из таблицы, для двух крайних случаев (раздвинутый и плотно сжатый пучки) разница подогревов и, соответственно, номинальных температур оболочки составляет 37 °С. Это очень существенная величина, если проектный режим работы твэлов близок к предельно допустимому температурному уровню. При этом речь идет о

твэлах центральной области ТВС, окруженных треугольными каналами, в которых, как правило, наблюдается максимальный подогрев теплоносителя. Принимается также, что градиент энерговыделения по радиусу ТВС отсутствует.

Кроме вычисления номинальных температур возникают проблемы и с упомянутым выше расчетом величины возможного перегрева оболочки от воздействия случайных факторов, в первую очередь, теплогидравлических. Проблемы обусловлены неопределенностью пределов возможного нарушения регулярной решетки пучка топливных стержней, приводящего к изменению расчетного режима течения теплоносителя особенно в пристенных каналах ТВС.

Все перечисленные модели по определению статичны, поскольку в них не предполагается случайное рассеивание размеров каналов относительно некоторой средней величины. А естественное желание как-то распорядиться исходным сборочным зазором (особенно в сжатой модели) приводит к стремлению произвольно сдвинуть отдельные твэлы в пределах возможных смещений, вызывая тем самым изменение расчетных размеров каналов (как один из факторов перегрева). Эти сдвиги очень субъективны и никак не обоснованы.

В существующих расчетных методиках [6 – 8] перегрев под воздействием случайных факторов пропорционален температуре или перепаду температуры, к которому он относится. Поэтому в соответствии с выражением (1) все перегревы пропорциональны перепадам, имеющим место на выходе из АЗ, в том числе и наибольшему номинальному подогреву теплоносителя. Чем больше подогрев, тем больше перегрев при прочих равных условиях.

Учитывая вышесказанное, отметим, что статичные модели пучка не дают возможности в полной мере учесть реальное влияние межканального тепломассообмена (МКО) на выравнивание температуры теплоносителя по длине АЗ в силу идентичности размеров каналов и их теплогидравлических характеристик (по условию). В регулярной решетке этот процесс будет эффективно проявляться лишь на периферии топливной сборки, где присутствуют каналы разного типа, выравнивая градиент температуры двух–трех рядов твэлов, но дальше в центр его влияние не распространяется [9].

### МОДЕЛЬ ПУЧКА С УЧЕТОМ СТАТИСТИКИ

Существующие противоречия в значительной мере устраняет разработанная в ГНЦ РФ-ФЭИ модель пучка, в которой размеры проходных сечений каналов вычисляются на основе результатов экспериментального изучения характера расположения твэлов в чехлах необлученных тепловыделяющих сборок [9, 10].

Для создания модели пучка с учетом статистики (далее – статистическая модель) использовались макетные ТВС быстрых реакторов БН-350 и БН-600 с измеренными в каждой сборке размерами оболочек твэлов и шестигранного чехла. Сборочный зазор в ТВС был разный – вплоть до максимальной величины  $2\delta_t = 2,9$  мм.

Чехол ТВС заливался эпоксидным компаундом для фиксации тепловыделяющих элементов от смещения, затем разрезался поперек на большое число частей. В каждом разрезе измерялось взаимное расположение всех твэлов пучка и вычислялись значения проходных сечений  $\Omega_i$  каждого канала.

Исследования показали, что формирование размеров каналов в пучке при изготовлении ТВС является случайным процессом. Тепловыделяющие элементы, имеющие некоторую радиальную свободу перемещения, под действием ряда причин изгибаются, сдвигаются в пределах возможного зазора, тем самым не образуя идеальную решетку стержней. В результате этих смещений размеры проходных сечений каналов распределяются по радиусу и высоте сборок в соответствии с некоторыми статистическими закономерностями.

При обработке экспериментального материала обнаружилась корреляция между теоретическим  $\delta_T$  и некоторым фактическим (среднестатистическим)  $\delta_\Phi$  сборочными зазорами, реализовавшимися в конкретных ТВС. Предполагая, что наличие зазоров в пучке объясняется упругими изгибными деформациями твэлов, связь между  $\delta_\Phi$  и  $\delta_T$  аппроксимировали линейной зависимостью

$$\delta_\Phi = 0,11 + 0,40\delta_T, \quad (2)$$

справедливой в исследованном интервале  $0,22 \text{ мм} \leq \delta_T \leq 1,45 \text{ мм}$ , что заведомо перекрывает диапазон вариации сборочного зазора в штатных ТВС реакторов типа БН-600, БН-800, составляющий  $0,27 \text{ мм} \leq \delta_T \leq 1,02 \text{ мм}$ .

Реальная (на основе экспериментов) модель пучка позволяет выделить в топливной сборке три типа каналов: треугольные каналы центральной области, треугольные каналы последнего ряда, примыкающие к пристенным твэлам, и пристенные прямоугольные каналы (рис. 1).

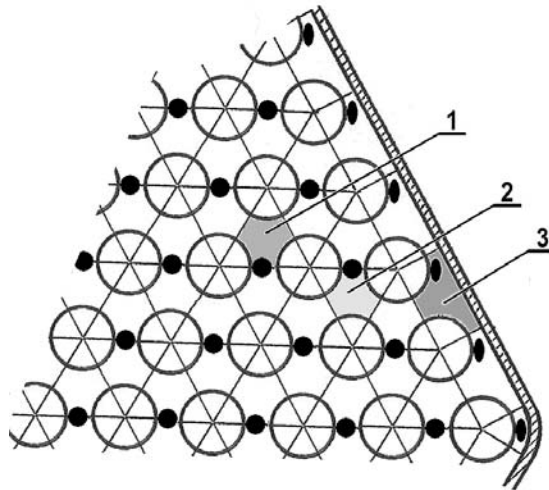


Рис. 1. Характерные каналы в поперечном сечении ТВС реакторов БН: 1 – треугольные каналы центральной области; 2 – треугольные каналы последнего ряда, примыкающие к пристенным твэлам; 3 – пристенные прямоугольные каналы

В расчетной модели используются значения усредненных по высоте твэла проходных сечений каналов  $\Omega_i^c$ . Математическое ожидание  $M(\Omega_i^c)$  совокупности сечений каналов каждого типа в пучке (генеральное среднее) обозначено как  $\Omega^{cпк}$ .

Представление экспериментальных результатов в виде размахов отклонений  $\Delta\Omega_i^c$  как разности размера  $i$ -го канала  $\Omega_i^c$  и минимальной, реализующейся в данной ТВС, величины  $\Omega^{c \min}$

$$\Delta\Omega_i^c = \Omega_i^c - \Omega^{c \min} \quad (3)$$

позволило аппроксимировать распределение существенно положительной случайной величины  $\Delta\Omega_i^c$  двухпараметрическим законом Вейбулла (рис. 2) с плотностью вероятности

$$\varphi(x) = (b/a) \cdot (x/a)^{b-1} \cdot \exp[-(x/a)^b], \quad (4)$$

где  $x = \Delta\Omega^c$  – случайная величина;  $a, b$  – параметры распределения.

Распределение Вейбулла было выбрано исходя из большой гибкости форм плотности вероятности при изменении определяющих параметров и удобства использования.

### КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МОДЕЛИ

Расчетные зависимости получены из аппроксимации распределением Вейбулла двух видов относительных  $\Delta\Omega_i^{отн}$  характеристик каналов:

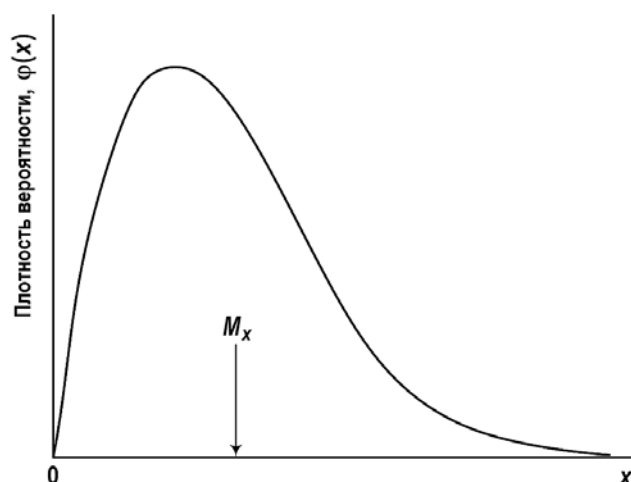


Рис. 2. График плотности вероятности распределения Вейбулла

$$\Delta\Omega_i^{\text{отн}} = (\Omega_i^c - \Omega_p^{\text{min}}) / W_p^{\text{min}}, \quad (5)$$

$$\Delta\Omega_i^{\text{отн}} = (\Omega_i^c - \Omega^c \text{ min}) / W_p^{\text{min}}. \quad (6)$$

Обработка статистики (5) для всех типов каналов позволила получить линейные зависимости среднего проходного сечения  $\Omega^{\text{спк}}$  от величины сборочного зазора  $\delta_{\text{ф}}$  в размерном виде, представленные в табл. 2 (величина зазора в мм, проходные сечения каналов в мм<sup>2</sup>). Зависимости справедливы в интервале  $0,20 \leq \delta_{\text{ф}} \leq 0,70$  мм и имеют полосу разброса  $\pm (1,0 - 1,9) \%$  для центральной и пристенной областей соответственно при 95 %-ой доверительной вероятности. Значения постоянных коэффициентов получены на основании аппроксимации экспериментальных данных.

Таблица 2

**Формулы для вычисления средних проходных сечений каналов различного типа**

Тип каналов	Расчетная формула
Треугольные центральной области	$\Omega^{\text{спк}} = (0,212\delta_{\text{ф}} + 0,986) \Omega_p^{\text{min}}$
Треугольные последнего ряда	$\Omega^{\text{спк}} = (0,314\delta_{\text{ф}} + 0,964) \Omega_p^{\text{min}}$
Прямоугольные пристенные	$\Omega^{\text{спк}} = (0,812\delta_{\text{ф}} + 0,958) \Omega_p^{\text{min}}$

Из обработки статистики (6) для каждого типа каналов найдена зависимость между средним проходным сечением каналов  $\Omega^{\text{спк}}$  и математическим ожиданием распределения Вейбулла:

$$\Omega^{\text{спк}} = \Omega^c \text{ min} + M_x \Omega_p^{\text{min}}, \quad (7)$$

где  $M_x = M(\Delta\Omega_i^{\text{отн}})$  – математическое ожидание распределения.

Кроме того, все основные характеристики распределения Вейбулла (параметры  $a$ ,  $b$ ,  $M_x$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ ) были выражены через величину фактического сборочного зазора  $\delta_{\text{ф}}$  для возможности вычисления плотности вероятности размеров каналов каждого типа. Взаимосвязь компонентов выражения (7) представлена на рис. 3.

Полученные закономерности модели пучка с учетом статистики позволяют представить тепловыделяющую сборку двояко в виде совокупности трех типов каналов:

– с постоянным для каждой группы средним проходным сечением  $\Omega^{\text{спк}}$  (табл. 2);



– с проходными сечениями в каждой группе при средней величине  $\Omega^{\text{спк}}$ , меняющимися в диапазоне от наименьшего размера  $\Omega^{\text{с min}}$  до наибольшего  $\Omega^{\text{с max}}$  по закону Вейбулла со своими параметрами распределения. Однако местоположение конкретного канала в группе не указывается.

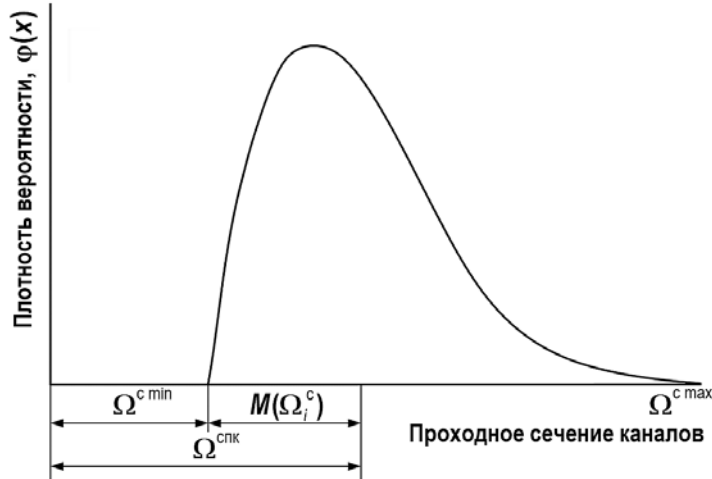


Рис. 3. Связь статистических характеристик проходных сечений каналов

Первый (среднестатистический) вариант (табл. 2) по сути аналогичен модели распределенных зазоров, но средние размеры каналов скорректированы в соответствии с величиной зазора на периферии ТВС. Он позволяет на всех этапах проектирования и эксплуатации реактора корректно вычислять номинальные значения подогрева теплоносителя  $\Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}}$  и, соответственно, температуры оболочек твэлов. Случайное отклонение подогрева от номинала за счет дисперсии размеров каналов можно учесть, используя в качестве одного из факторов перегрева рассеивание размеров каналов от средней  $\Omega^{\text{спк}}$  до минимальной  $\Omega^{\text{с min}}$  величины.

Второй вариант дает вероятностное распределение каналов по размерам (рис. 3), позволяя определить количество каналов, попадающих в тот или иной интервал проходных сечений. Такое представление пучка твэлов дает возможность помимо номинального значения подогрева ( $\Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}}$ ) вычислить его рассеивание за счет дисперсии размеров каналов и учесть при этом межканальный тепломассообмен, имеющий место при продольном движении натрия в пучке. Этот процесс существенно сглаживает различия подогревов в отдельных каналах, уменьшая в ТВС неравномерность температуры теплоносителя на выходе из АЗ по сравнению со случаем стандартного (см. первый вариант) вычисления перегрева натрия под влиянием дисперсии размеров каналов. Результаты такого сопоставления будут приведены ниже.

Поскольку положение каждого конкретного канала в пучке случайно, реализация модели состоит в многократном расчетном конструировании топливной сборки с использованием метода Монте-Карло (М-К) по заданным законам распределения размеров каналов.

Случайный размер проходного сечения канала записывается в виде

$$\Omega_i^{\text{с}} = \Omega^{\text{с min}} + x \Omega_p^{\text{min}}, \quad (8)$$

где  $x = \Delta \Omega_i^{\text{отн}}$  – случайная величина, распределенная по закону Вейбулла (4). Преобразовав  $x$  по соотношению

$$x = -a [\ln(1 - y)]^{1/b} \quad (9)$$

в случайную величину  $y$ , равномерно распределенную на интервале (0; 1), находим случайный размер проходного сечения канала

$$\Omega_i^c = \Omega^{\min} + \Omega_p^{\min} a[\ln(1-y)^{-1}]^{1/b}. \quad (10)$$

Значения  $y$  разыгрывают с помощью генератора случайных чисел и получающимися по выражению (10) размерами проходных сечений построчно заполняют всю область топливной сборки, занятую каналами данного типа. Затем проводится теплогидравлический расчет ТВС. Многократное повторение операции позволяет получить основные статистические характеристики температурного поля теплоносителя для любого канала: математическое ожидание  $M(\Delta t_{i\text{ТН}})$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma(\Delta t_{i\text{ТН}})$ , используемые в дальнейших расчетах температуры оболочки твэлов с учетом факторов перегрева.

Оба варианта статистической модели дают одно и то же значение среднего подогрева теплоносителя  $M(\Delta t_{i\text{ТН}}) = \Delta t_{\text{ТН}}^H$  в каналах рассматриваемой группы (табл. 1, столбец 4), однако второй вариант демонстрирует рассеивание подогрева в соответствии с дисперсией размеров проходных сечений.

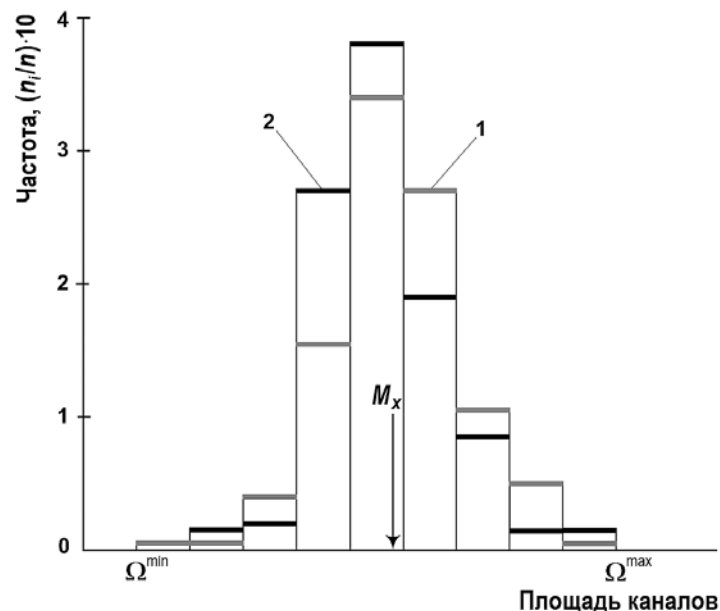


Рис. 4. Сопоставление гистограмм распределения площади треугольных каналов в базовом разрезе ТВС реактора «Феникс» (1) и в одном из разрезов макетной ТВС реактора БН-600 (2)

Статистический характер распределения размеров каналов в пучке подтвержден анализом поперечных разрезов облученной до выгорания 6,6% т.а. ТВС французского реактора «Феникс» [11]. Сравнение гистограмм площадей треугольных каналов в базовом (нераспухшем) сечении ТВС «Феникс» и в одном из сечений макетной ТВС БН-600, выполненное при одинаковом числе интервалов разбиения и совмещении математических ожиданий, представлено на рис. 4 без указания конкретных размеров каналов и показало хорошее совпадение результатов по характеру распределения. Гистограмма распухшей части пучка ТВС «Феникс» показывает небольшое уменьшение математического ожидания и увеличение примерно в два раза разброса площадей каналов.

Кроме того, прямыми измерениями температуры теплоносителя в каналах инструментированной ТВС «Тетакупль» французского реактора «Рапсодия» модель сжатого пучка не подтверждается [12, 13].

Рассмотрим теперь применение статистической модели к теплогидравлическим расчетам твэлов ТВС быстрых реакторов. При обсуждении результатов будем сравнивать статистический пучок с плотно сжатым пучком как наиболее консервативной моделью.



### ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИ ПУЧКА С УЧЕТОМ СТАТИСТИКИ

– Использование для ТВС с параметрами быстрого реактора (например, типа БН-800) варианта среднестатистической модели приводит по сравнению со сжатым пучком к выравниванию температурного поля по сечению кассеты ( $\Delta t_{\text{ТН}}^{\text{H}} / \Delta t_{\text{ТВС}}^{\text{C}} \approx 1,15$ ) и снижению подогрева теплоносителя  $\Delta t_{\text{ТН}}^{\text{H}}$ , а следовательно, и расчетной номинальной температуры оболочки центральных твэлов, примерно на 17 °С (табл. 1, столбцы 3, 4).

– При использовании варианта модели пучка, построенной методом М-К, учет внутрикассетного межканального обмена снижает случайный перегрев теплоносителя, вызванный дисперсией проходных сечений каналов, с  $\delta(\Delta t_{\text{ТН}}) \approx 18$  °С (рис. 5) до  $\delta(\Delta t_{\text{ТН}}) \approx 4 - 5$  °С (рис. 6). Таким образом, по сравнению с вариантом изолированных каналов перегрев становится меньше примерно на 13 – 14 °С.

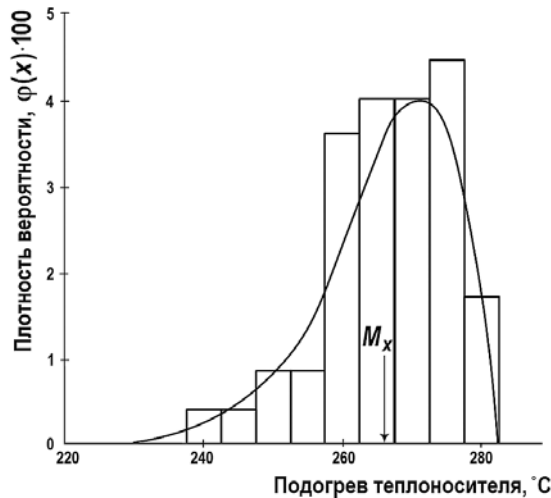


Рис. 5. Распределение подогрева теплоносителя в каналах центральной области при случайном изменении проходных сечений, вычисленное без учета МКО (аналитическая кривая и гистограмма, полученная методом М-К).  $M_x = \Delta t_{\text{ТН}}^{\text{H}} = 266$  °С

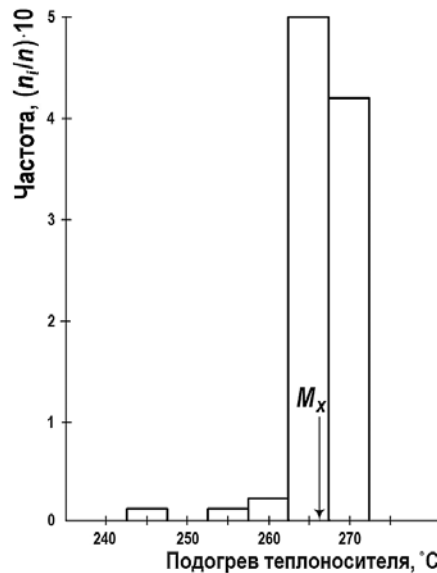


Рис. 6. Распределение подогрева теплоносителя в каналах центральной области при случайном изменении проходных сечений, вычисленное с учетом МКО (гистограмма, полученная методом М-К).  $M_x = \Delta t_{\text{ТН}}^{\text{H}} = 266$  °С

Следует отметить, что межканальный обмен сглаживает рассеивание подогрева внутри ТВС и от дисперсии энерговыделения, вызванной, например, разбросом загрузки топлива в твэ-

лы. Этот эффект может быть учтен аналогично эффекту от рассеивания размеров каналов.

Полученные результаты позволяют рассматривать разброс подогрева теплоносителя в статистическом пучке как новую случайную переменную со своим законом распределения и характеристиками рассеивания. С учетом МКО величину перегрева  $\delta(\Delta t_{\text{тн}})$  относительно номинала, обусловленную дисперсией размеров каналов, можно закладывать в расчет общего отклонения подогрева теплоносителя от случайных причин в виде фактора перегрева  $F_{\Delta t_{\text{тн}}} = \delta(\Delta t_{\text{тн}})_{\Omega} / \Delta t_{\text{тн}}^{\text{н}}$ , при этом фактор, учитывающий дисперсию проходных сечений каналов, в расчетные зависимости уже не входит.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование расчетной модели, основанной на экспериментальном исследовании статистического распределения одной из основных гидравлических характеристик ТВС – проходного сечения каналов в пучке твэлов, – и, как следствие этого, возможность учета межканального теплообмена по длине топливных элементов является эффективным методом повышения достоверности определения рабочей температуры материала оболочки твэла.

## Литература

1. Усынин Г.Б., Карабасов А.С., Чирков В.А. Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1981.
2. Кузеванов В.С., Баклушин Р.П. Тепловой и гидравлический расчет активных зон реакторов: Учебное пособие по курсу «Теплогидравлический расчет реакторов». – Обнинск: ИАТЭ, 1988.
3. Скок Ж. Тепловые и гидравлические исследования активной зоны 250М. Геометрические, гидравлические и тепловые характеристики активной зоны реактора «Феникс 250М». / Пер. с фр. – М.: Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы и документов. Пер. № СР-2942, 1977.
4. Miki K. Deformation analysis of fuel pins within the wire-wrap assembly of an LMFBR. – Nuc. Eng. and Des. 1979, v. 52, pp. 371–382.
5. Weber G., Cornet G. Thermohydraulic characteristics of SNR – fuel elements. Karlsruhe, FRG, 5 – 7 February 1978, JWGF/29, pp. 29–58.
6. Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах. / Под ред. Ф.М. Митенкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Клемина И.И., Стригулин М.М. Некоторые вопросы надежности ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1968.
8. Курбатов И.М., Тихомиров Б.Б. Расчет случайных отклонений температур в активной зоне реактора: Препринт ФЭИ-1090, Обнинск, 1980.
9. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Богословская Г.П., Жуков А.В., Поплавский В.М. и др. Метод расчета температурного поля в кассете твэлов быстрого реактора при случайном распределении параметров по методу Монте-Карло: Препринт ФЭИ-1340, Обнинск, 1982.
11. Marbach J. Comportement d'un faisceau d'aiguilles Phenix sous irradiation. % In Irradiation Behaviour of Metallic Materials for Fast Reactor Core Components. Et Edite par J. Poirier et. I.M. Dupony – CEA – DMECH – B.P. № 2 – 91190 GIF – Sur – YIETTE, France, pp. 297 – 301.
12. Cognet G. Evolution en fonction de l'irradiation du profil de temperature en sortie du faisceau d'assemblage dans le reacteur Rapsodie – experience TETACOUPLE. Seminaire CEA – GKAE – Octobre 86 – Cen Cadarache, France.
13. Leteinturier D., Cartier L. Theoretical and Experimental Investigations of the Thermohydraulics of Deformed Wire – Wrapped Bundles in Nominal Flow Conditions. In ref. [5], pp. 254 – 261.

Поступила в редакцию 30.10.2013 г.

## Авторы

Тихомиров Борис Борисович, ведущий научный сотрудник,  
кандидат техн. наук  
E-mail: tibb@ippe.ru

Поплавский Владимир Михайлович, советник генерального директора,  
доктор техн. наук, профессор  
E-mail: vmpropl@ippe.ru

## EFFECT OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF FUEL PIN BUNDLE ON EVALUATION OF TEMPERATURE IN THE CORE OF SODIUM COOLED FAST REACTOR

Tikhomirov B.B., Poplavsky V.M.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky.

1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

### ABSTRACT

The article is devoted to optimization of analytical models used for the evaluation of fast reactor (FR) fuel element cladding temperature with the aim to increase the fidelity of the results obtained.

The rated value of the fuel element cladding temperature at the core outlet in FR fuel subassemblies is basically determined by the coolant temperature. However, calculation of the coolant temperature in the channels surrounding the fuel elements requires knowledge of the model of the fuel pin bundle arranged in a triangular grid. Distribution of the local flow rates and, hence, coolant temperature rise values in the channels over the pin bundle cross section is fully dependent on the arrangement of the fuel elements in the fuel subassembly wrapper taking into account the technological fitting gap.

Various hypothetical bundle models adopted for the calculation were studied and their drawbacks were identified. The difference in sodium temperature rise values for the different models is over 30 °C. The models are static, so they do not allow taking into account to the full extent radial and, particularly, axial heat and mass transfer that would decrease non-uniformity of the fuel element cladding temperatures.

A bundle model was developed based on the results of experimental studies of fuel element arrangement in fresh fuel subassemblies. It is demonstrated that formation of channel dimensions at the stage of manufacturing subassemblies with fuel pin bundles is a stochastic process following statistical laws. The relationships between characteristics of the fuel pin bundle required for calculation and the value of the technological fitting gap in the fuel subassembly were obtained by processing statistic data using the Weibull distribution.

There are two pin bundle models created taking into account statistics, one of which allows using the most probable statistically average dimensions of different type channels instead of hypothetical dimensions in the calculation of the rated value of sodium temperature rise at the design development stage. The second option makes it possible to evaluate the random dispersal of temperature rise values in the pin bundle taking into account axial and radial heat and mass transfer. This significantly increases the fidelity of evaluating the working temperatures of the hottest fuel elements.

**Key words:** sodium cooled fast reactors, fuel subassemblies, fuel element bundle models, cladding temperature evaluation, statistics-modified model, inter-channel exchange

### REFERENCES

1. Usynin G.B., Karabasov A.S., Chirkov V.A. *Optimizatsionnye modeli reaktorov na bystryh nejtronah* [Optimisation models for fast neutron reactors]. Moscow, Atomizdat Publ., 1981. 232 p. (in Russian)
2. Kuzevanov V.S., Baklushin R.P. *Teplovoj i gidravlicheskiy raschyot aktivnykh zon reaktorov: Uchebnoe posobie po kursu «Teplogidravlicheskiy raschyot reaktorov»* [Calculation of thermal and hydraulic characteristics of reactor cores: Textbook on thermal and hydraulic analysis of reactors]. Obninsk, OIAE Publ., 1988. 64 p. (in Russian)

3. Skok Zh. *Teplovye i gidravlicheskie issledovaniya aktivnoj zony 250 M. Feniks. Avant-proekt.* [Thermal and hydraulic studies on 250 M core. Phoenix. Avante-project]. Per. s fr. Moscow, Vsesoyuznyj centr perevodov nauchno-tehnicheskoy literatury i dokumentov. Per. No. SR-2942, Publ. 1977. 93 p.
4. Miki K. Deformation analysis of fuel pins within the wire-wrap assembly of an LMFBF. *Nuc. Eng. and Des.* 1979, v. 52, pp. 371–382.
5. Weber G., Cornet G. Thermohydraulic characteristics of SNR – fuel elements. Karlsruhe, FRG, 5 – 7 February 1978, JWGF/29, pp. 29–58.
6. Usynin G.B., Kusmartsev E.B. *Reaktory na bystryh nejtronah. Pod red. F.M. Mitenkova.* [Fast neutron reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1985. 288 p. (in Russian)
7. Klyomin A.I., Strigulin M.M. *Nekotorye voprosy nadyozhnosti yadernyh reaktorov* [Some issues of reliability of nuclear reactors]. Moscow, Atomizdat Publ. 1968. 352 p. (in Russian)
8. Kurbatov I.M., Tikhomirov B.B. *Raschyot sluchajnyh odklonenij temperatur v aktivnoj zone reaktora:* Preprint FEI-1090. [Evaluation of random departures of reactor core temperatures. Preprint FEI-1090]. Obninsk, FEI, Publ. 1980. (in Russian)
9. Zhukov A.V., Kirillov P.L., Matyukhin N.M., Sorokin A.P., Tikhomirov B.B., Ushakov P.A., Yur'ev Yu.S. (SSSR), Mantlik F., Gejna Ya., Schmid J., Shul'c V., Krett V. (ChSSR). *Teplogidravlicheskiy raschyot TVS bystryh reaktorov s zhidkometallicheskim ohlazhdeniem* [Calculation of thermal and hydraulic characteristics of fuel subassemblies of liquid metal cooled fast reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1985. 160 p. (in Russian)
10. Bogoslovskaya G.P., Zhukov A.V., Poplavskij V.M., Sorokin A.P., Tikhomirov B.B., Ushakov P.A. *Metod raschyota temperatur'nogo polya v kassete tvelov bystrogo reaktora pri sluchajnom raspredelenii parametrov po metodu Monte-Karlo;* Preprint FEI-1340. [Method of calculation of temperature profile of the fuel subassembly of fast reactor with random parameters distribution using Monte Carlo method. Preprint FEI-1340]. Obninsk, FEI Publ. 1982. (in Russian)
11. Marbach J. Comportement d'un faisceau d'aiguilles Phenix sous irradiation. – In Irradiation Behaviour of Metallic Materials for Fast Reactor Core Components. Et Edite par J. Poirier et. I.M. Dupony – CEA – DMECH – B.P. № 2 – 91190 GIF – Sur – YIETTE, France, pp. 297 – 301. (in French)
12. Cognet G. Evolution en fonction de l'irradiation du profil de temperature en sortie du faisceau d'assemblage dans le reacteur Rapsodie – experience TETACOUPLE. Seminaire CEA – GKAE – Octobre 86 – CEN Cadarache, France. (in French)
13. Leteinturier D., Cartier L. Theoretical and Experimental Investigations of the Thermohydraulics of Deformed Wire – Wrapped Bundles in Nominal Flow Conditions. In ref. [5], pp. 254 – 261.

## Authors

Tikhomirov Boris Borisovich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [tibb@ippe.ru](mailto:tibb@ippe.ru)

Poplavsky Vladimir Mikhailovich, Adviser to Director General, Professor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [vmopl@ippe.ru](mailto:vmopl@ippe.ru)