

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА В СБОРКАХ ТВЭЛОВ И НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

А.В. Жуков, Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского, г. Обнинск



Систематизируются сведения по теплоотдаче и температурным полям твэлов в треугольной и квадратной решетках, обтекаемых жидкими металлами. Подчеркивается необходимость подробных дополнительных исследований для квадратной решетки твэлов.

Сведения по расчету коэффициентов теплоотдачи и максимальных неравномерностей температуры по периметру твэлов с жидкометаллическим охлаждением получены в ГНЦ РФ-ФЭИ для треугольных решеток твэлов в широких интервалах изменения определяющих параметров (шаг решеток твэлов $1,0 \leq s/d \leq 2,0$, число Пекле $1 \leq Pe \leq 4000$, число Прандтля $0,007 \leq Pr \leq 0,03$, параметр эквивалентной теплопроводности твэлов $0,02 \leq \epsilon \leq 16$). Они позволили выявить основные закономерности теплообмена в решетках твэлов с жидкометаллическим охлаждением. Формулы носят универсальный характер, т. к. применимы для любых цилиндрических твэлов с охлаждением жидким металлом. Вместе с тем для квадратных решеток твэлов требуется проведение соответствующих исследований, на что обращается внимание в данной статье.

Отметим особенности теплообмена, имеющие место в сборках цилиндрических твэлов, обтекаемых жидким металлом.

Центральные твэлы составляют регулярную (бесконечную) зону ТВС. Они окружены ячейками одинаковой геометрии и работают в симметричных условиях: в ячейках наблюдаются одинаковые расходы и подогревы теплоносителя. Характер температурных полей обычно косинусоидальный (или близкий к нему) с шестью максимумами и шестью минимумами для треугольной решетки по периметру твэла. Для квадратной решетки имеют место четыре максимума и четыре минимума. Неравномерности температуры – это разности максимумов и минимумов температуры в узких и широких местах ячеек соответственно на периметре $\Delta\varphi=30^\circ$ ($\Delta\varphi=45^\circ$ для квадратной решетки). В условиях $q=\text{const}$ (по длине канала) происходит тепловая стабилизация.

Периферийные (пристенные) твэлы окружены ячейками разной геометрии, в которых наблюдаются разные расходы теплоносителя, подогревы в ячейках не одинаковы, что определяет несимметричные условия работы твэлов. Характер температурных полей связан с общей неравномерностью температуры на всем пери-

метре твэла ($\Delta\varphi \sim 180^\circ$), обычно заметно превышающей неравномерность температуры центральных твэлов и приближенно описываемой первой гармоникой разложения температурного поля в ряд Фурье. В условиях $q=\text{const}$ (по длине канала) стабилизация часто отсутствует.

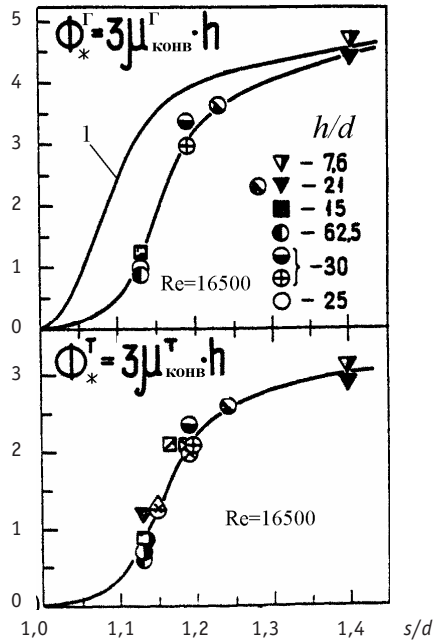


Рис. 1. Межканальный конвективный обмен при дистанционировании твэлов «ребро по ребру» (треугольная решетка твэлов). Обмен массой (Γ) и теплом (T). 1 – дистанционирование твэлов «ребро по оболочке» (для сравнения)

дистанционирующих устройств на межканальное перемешивание и степень турбулизации потока; неравномерностью распределения теплоносителя по ячейкам различной геометрии (центральные, периферийные каналы) и т.д.

Обобщенные зависимости (рис. 1) для конвективных коэффициентов межканального обмена (μ) в треугольных решетках твэлов с проволочными навивками типа «ребро по ребру» соответствуют формулам (для квадратной решетки твэлов данные отсутствуют)

$$\left. \begin{aligned} \mu_{конв\ ij}^{\Gamma} &= \pm \frac{V_{\max}}{V_{ц.я.}} \sin^2 2 \left(\frac{2\pi Z}{h} - \alpha_{ij} \right), \\ \mu_{конв}^{\Gamma} &= \frac{1}{3h} \Phi_{\Gamma}^*(x) \Psi(Re), \\ \mu_{конв}^T &= \gamma \mu_{конв}^{\Gamma}, \\ \gamma &= 0,7, \\ \Phi_{\Gamma}^*(x) &= 2,16 - 3,16e^{-1210(x-1)^6} + 1, \\ \Psi(Re) &= 1,085 - 0,754 \exp(-0,132 \cdot 10^{-3} Re), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $1,01 \leq x = s/d \leq 1,4$; $5 < h/d < 65$; $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^5$; h – шаг навивки; V – расход; Γ – гидродинамический; T – тепловой; конв. – конвективный; ц.я. – центральные ячейки ij ; \max – максимальный.

Жидкие металлы имеют большие коэффициенты теплопроводности, но малые коэффициенты объемной теплоемкости. Большие подогревы теплоносителя и высокие коэффициенты теплообмена приводят к тому, что профиль температуры поверхности твэлов, омываемых жидкими металлами, определяется, в основном, локальными подогревами теплоносителя, а не локальными коэффициентами теплообмена. Вышесказанное в особой мере относится к периферийным твэлам, по периметру которых имеют место особенно большие разности в подогревах теплоносителя, а следовательно, и неравномерности температуры.

Взаимосвязанность каналов ТВС. Формирование полей скорости и температуры в ТВС реакторов, представляющих собой систему взаимосвязанных каналов, между которыми осуществляется обмен массой, импульсом и теплом (рис. 1), имеют особенности по сравнению с изолированными каналами. Помимо массообмена между каналами, эти особенности определяются более сильным, чем в изолированных каналах, влиянием случайных геометрических отклонений (прогибы, сдвиги твэлов) на распределение расходов; влиянием

Параметр эквивалентной теплопроводности твэлов объединяет свойства теплопроводности компонентов твэла в единый безразмерный параметр эквивалентной теплопроводности твэла $\varepsilon = \varepsilon_{k_0}$, что уменьшает число определяющих параметров в критериальных зависимостях, приводя их к виду

$$\left. \begin{aligned} \overline{Nu} &= \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_f} \frac{d_f}{R} = f_1(Re, Pr, x, \varepsilon) \\ \frac{t_w^{\max} - \bar{t}_w}{\bar{q}} \lambda_f &= f_2(Re, Pr, x, \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где \bar{q} , $\bar{\alpha}$ – средний по периметру твэла тепловой поток и коэффициент теплоотдачи соответственно; $R = d/2$ – внешний радиус оболочки твэла; $x = s/d$ – относительный шаг твэлов (s – расстояние между центрами твэлов); λ_f – теплопроводность теплоносителя; d_f – гидравлический диаметр бесконечной решетки твэлов:

- для треугольной решетки $d_f = d \left[\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) x^2 - 1 \right]$,
- для четырехугольной – $d_f = d \left[\left(\frac{4}{\pi} \right) x^2 - 1 \right]$.

Первая зависимость дает возможность определять среднюю по периметру твэла температуру поверхности (\bar{t}_w), а вторая – максимальное отклонение температуры от среднего значения – $(t_w^{\max} - \bar{t}_w)$ (неравномерность температуры). Часто рассматривают неравномерность $(t_w^{\max} - t_w^{\min})$.

Параметр $\varepsilon = \varepsilon_{k_0}$ рассчитывается по основной гармонике разложения температурного поля твэла в ряд Фурье ($k_0 = 6$ и 4 для треугольной и квадратной решеток соответственно). Он важен для тесных решеток твэлов ($x = s/d < 1,3$), когда по периметру твэлов имеют место неравномерности температуры.

Параметр ε для цилиндрических твэлов находят из выражений, приведенных в [1 – 4]. В частности, для твэла без оболочки

$$\varepsilon = \lambda_w / \lambda_f \quad (3)$$

для твэла с одной оболочкой

$$\varepsilon = (\lambda_w / \lambda_f) (1 - m_1 \xi^{2k_0}) / (1 + m_1 \xi^{2k_0}), \quad (4)$$

где $\xi = R_1/R$ – относительная толщина оболочки (R_1 – внутренний радиус оболочки); $m_1 = \frac{\lambda_w - \lambda_T}{\lambda_w + \lambda_T}$; λ_T , λ_w , λ_f – теплопроводности топлива, оболочки и теплоносителя соответственно.

ТРЕУГОЛЬНАЯ РЕШЕТКА ТВЭЛОВ

Температурные поля и теплообмен в центральных зонах ТВС. Теплоотдача в «бесконечных» решетках твэлов рассчитывается по формуле [1, 3, 5, 6]

$$Nu = Nu_n + f(\varepsilon, s/d) Pe^{s/d}, \quad 1,0 \leq s/d \leq 2; \quad 0,1 \leq \varepsilon \leq \infty; \quad 1 \leq Pe \leq 4000, \quad (5)$$

где Nu_n – число Нуссельта для ламинарного течения теплоносителя (рис. 2); ε – параметр теплового подобия твэлов, рассчитанный по основной гармонике ($k=6$) [4]; $f(s/d)$ и $\varphi(s/d)$ – эмпирические функции. В критериях за характерный размер принят эквивалентный гидравлический диаметр «бесконечной» решетки твэлов.

Значения Nu_n , f и φ систематизируются в табл. 1.

Структура формулы (5) полностью сохраняется лишь для диапазона относительных шагов $1,0 \leq x \leq 1,20$. Для других характерных значений x составляющие этой формулы упрощаются, например, для $x=1$; $1,2 \leq x \leq 2,0$ (см. табл.1).

Таблица 1

Формулы для расчета величин Nu_n , f и φ в соотношении (5) ($x=s/d$)

Параметр	$x=1,0$	$1 \leq x \leq 1,2$	$1,2 \leq x \leq 2$
Nu_n	$1,25 \left(1 - \frac{3,6}{4,2 + 2,5\epsilon^{0,86}} \right)$	$\left[7,55x - \frac{6,3}{x^{17x(x-0,81)}} \right] \times$ $\times \left[1 - \frac{3,6x}{x^{20} (1 + 2,5\epsilon^{0,86}) + 3,2} \right]$	$7,55x - 20x^{-13}$
f	$0,041 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1,24\epsilon + 1,15}} \right)$	$\frac{0,041}{x} \left[1 - \frac{1}{\frac{x^{30} - 1}{6} + \sqrt{1,24\epsilon + 1,15}} \right]$	$\frac{0,041}{x^2}$
φ	0,65	$\varphi = 0,56 + 0,19x - \frac{1}{10x^{80}}$	$0,56 + 0,19x$

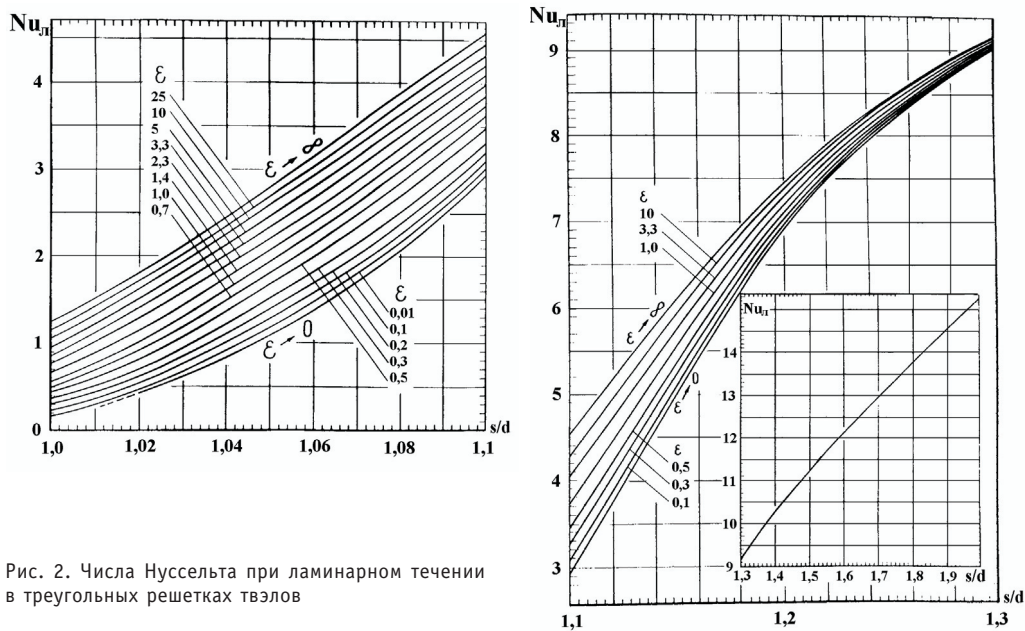


Рис. 2. Числа Нуссельта при ламинарном течении в треугольных решетках твэлов

Погрешность формулы (5) 15%.

Максимальные неравномерности температуры по периметру твэлов рассчитываются по формуле ($1,0 \leq s/d \leq 1,15$; $1,0 < Pe \leq 2000$; $\epsilon \geq 0,2$) [1, 3, 5, 7]

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda_f = \frac{\Delta T_n}{1 + \gamma(\epsilon) Pe^{\beta(s/d)}}, \pm 5\%, \quad (6)$$

где ΔT_n – неравномерность температуры при ламинарном режиме течения, определяемая по номограмме (рис. 3), $\gamma(\epsilon)$ и $\beta(s/d)$ – эмпирические функции:

$$\gamma(\epsilon) = (1 + 0,03\epsilon) \cdot 8 \cdot 10^{-3} \quad (6a)$$

$$\beta(s/d) = 0,65 + \frac{51 \lg(s/d)}{(s/d)^{20}}. \quad (66)$$

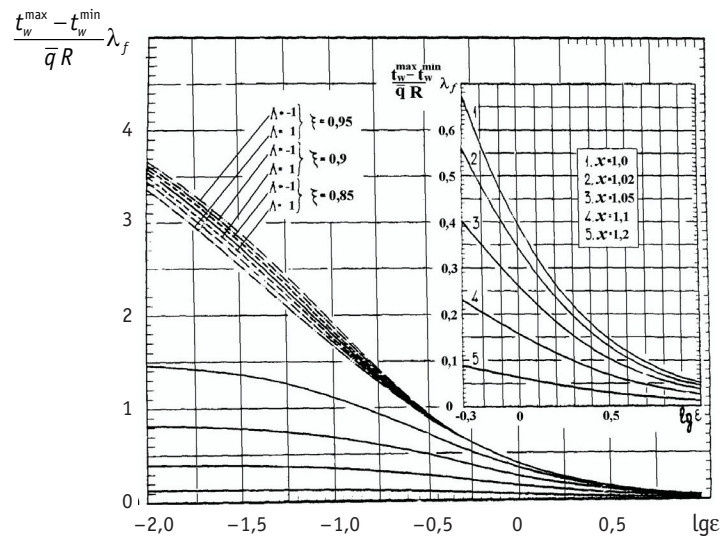


Рис. 3. Номограмма для определения максимальной неравномерности температуры твэлов треугольной решетки при ламинарном течении теплоносителя: $\Lambda = (\lambda_w - \lambda_T) / (\lambda_w + \lambda_T)$; $x = s/d$; $\xi = R_1/R$; $\epsilon = \epsilon_6$

Отклонение распределения температуры от косинусоидального может приближенно оцениваться по формуле

$$Z = \frac{t_w^{\max} - \bar{t}_w}{t_w - t_w^{\min}} = 0,9 + A_1(s/d) + A_2(s/d) - A_3(s/d, \epsilon), \quad (7)$$

$$A_1(s/d) = 0,1 \{1 - \exp[-10(s/d - 1)]\}, \quad (7a)$$

$$A_2(s/d) = 0,2 \exp[-50(s/d - 1)], \quad (7b)$$

$$A_3(s/d, \epsilon) = 0,49 \exp[-20(s/d - 1)] \operatorname{th}[\lg \epsilon - 6(s/d - 1) + 0,6]. \quad (7b)$$

Температурные поля и теплообмен в периферийных зонах ТВС. В «тесных» сборках твэлов ($s/d=1,04$; $1,062$) без вытеснителей неравномерность температуры боковых твэлов обусловлена недогревом теплоносителя у чехла [8]. На общую неравномерность температуры накладывается периодическая неравномерность, обусловленная геометрией канала. Периодичность наиболее выражена при больших числах Пекле и на малых расстояниях от начала энерговыделения, когда невелики азимутальные перетечки тепла.

Неравномерность $\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda_f$ считается положительной, если максимальная температура твэлов наблюдается со стороны центральных каналов (недогрев теплоносителя на периферии). Неравномерность считается отрицательной, если максимальная температура твэлов наблюдается со стороны чехла (перегрев теплоносителя на периферии). Знак при ΔT имеет условное значение, однако помогает выявить зоны перегрева и недогрева теплоносителя по периметру твэла.

Расчет максимальных неравномерностей температуры боковых твэлов можно проводить по обобщенной формуле ($200 \leq \text{Pe} \leq 700$; $l/d_r \geq 200$) [9]

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda_f = A + B\psi - C \exp(-D\psi), \pm 5\%, \quad (8)$$

где константы A , B , C , D табулированы; $\psi = \Delta/(s-d)$, Δ – расстояние между обечайкой и твэлами.

Коэффициенты теплоотдачи периферийных твэлов. Значительные неравномерности температуры по периметру периферийных твэлов ТВС быстрых реакторов обуславливают снижение коэффициентов теплоотдачи в периферийных зонах ТВС по сравнению с центральной зоной, что делает необходимым использование специальной формулы для расчета коэффициентов теплоотдачи периферийных твэлов [8]:

$$Nu = \frac{\bar{\alpha} d_r}{\lambda_f} = a + b Pe^n, \pm 15\%, \quad (9)$$

где $1,04 \leq s/d \leq 1,3$; $0,39 \leq \Psi = \Delta/(s-d) \leq 0,52$; $30 \leq Pe \leq 3000$; $0 \leq d_b/d \leq 0,32$; $0,04 \leq \varepsilon_1 \leq 0,14$; d_b – диаметр вытеснителя; в (8) и (9) Pe рассчитывается по параметрам центральной ячейки, параметр эквивалентной теплопроводности твэлов – по первой гармонике разложения температурного поля в ряд Фурье; a, b, n – коэффициенты (табулированы).

КВАДРАТНАЯ РЕШЕТКА ТВЭЛОВ

Результаты исследований ограничены, их необходимо получить, по крайней мере, в имеющемся объеме для треугольной решетки твэлов.

Имеется формула для чисел Нуссельта в области раздвинутых решеток твэлов для конкретного $\varepsilon_4 = 1,4$ [10, 11, 14, 15]:

$$Nu = 7,55x - \frac{14}{x^5} + 0,007 Pe^{0,64+0,246x} \pm 15\%, \quad (10)$$

$1,20 \leq x = s/d \leq 1,50$; $10 \leq Pe \leq 2500$; $\varepsilon_4 \cong 1,4$.

Число Пекле рассчитывается по гидравлическому диаметру «бесконечной» ячейки квадратной решетки твэлов и скорости теплоносителя в этой ячейке.

Составляющая

$$Nu_n = 7,55x - \frac{14}{x^5} \quad (10a)$$

есть число Нуссельта для ламинарного течения в решетках твэлов с $x = s/d = 1,20-1,50$ и $\varepsilon \cong 1,4$.

Для области решеток твэлов с $1,0 \leq s/d \leq 1,25$ при $\varepsilon \cong 1,4$ справедливо соотношение, совпадающее с данными для $s/d = 1,25$ [10, 11] и для $s/d = 1,0$ [12]. Его вид [13]:

$$Nu = Nu_n + \Delta Nu_{\text{турб}} = -9,25 \frac{s}{d} + 10,2 \left(\frac{s}{d} \right)^{2,2} + a Pe^b, \pm 15\%, \quad (11)$$

где

$$Nu_n = -9,25 \frac{s}{d} + 10,2 \left(\frac{s}{d} \right)^{2,2} \quad (11a)$$

есть ламинарная составляющая в числе Nu (ее определение при разных s/d и $\varepsilon = 1,4$ производится по номограмме (рис. 4)),

$$\Delta Nu_{\text{турб}} = a Pe^b \quad (11b)$$

есть турбулентная составляющая в числе Nu :

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,101433 - 0,2053 \frac{s}{d} + 0,1039 \left(\frac{s}{d} \right)^2 \\ b &= 0,6173 \left(\frac{s}{d} \right)^{-10,275} + 0,9043 \end{aligned} \right\} \quad (11b)$$

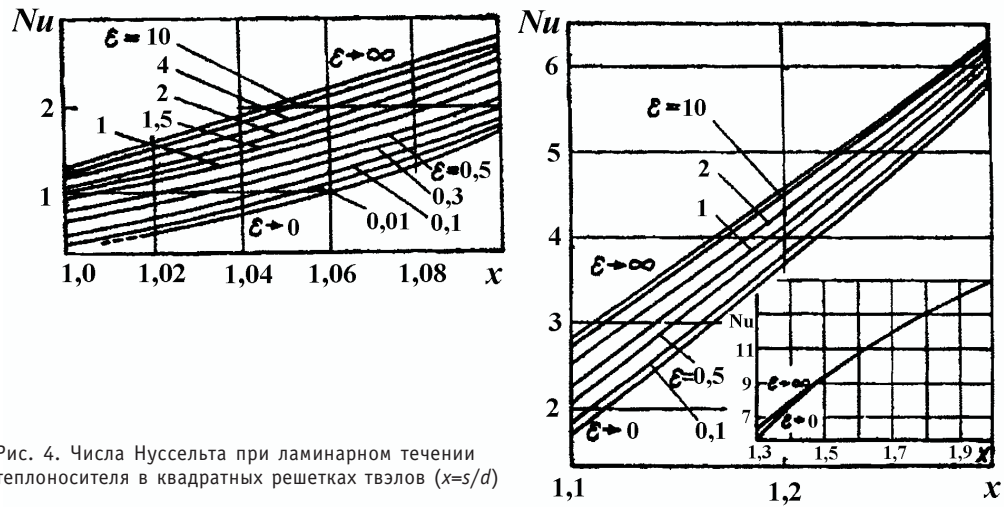


Рис. 4. Числа Нуссельта при ламинарном течении теплоносителя в квадратных решетках твэлов ($x=s/d$)

Как видно, для квадратной решетки твэлов сделана попытка получения обобщенной формулы типа (5). Поскольку (11) справедлива лишь для $\varepsilon_4 \cong 1,4$ в данном интервале s/d , то предстоит большая работа по получению экспериментального материала для других значений ε и s/d при турбулентном течении теплоносителя.

Максимальная неравномерность температуры по периметру твэлов рассчитывается по формуле ($1,20 \leq s/d \leq 1,35$; $1 \leq Pe \leq 2000$; $\varepsilon \cong 1,4$) [10, 11, 14, 15]:

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q} R} \lambda_f = \frac{1,5 \left(\frac{s}{d} \right)^2 - 4,53 \left(\frac{s}{d} \right) + 3,45}{1 + 5 \cdot 10^{-4} Pe^{1,223 \frac{s}{d} - 0,42}}, \quad \pm 7\%. \quad (12)$$

Числитель этой формулы есть значение ΔT_n для ламинарного режима течения в решетках твэлов с $1,20 \leq s/d \leq 1,35$ при $\varepsilon=1,4$, что соответствует номограмме (рис.

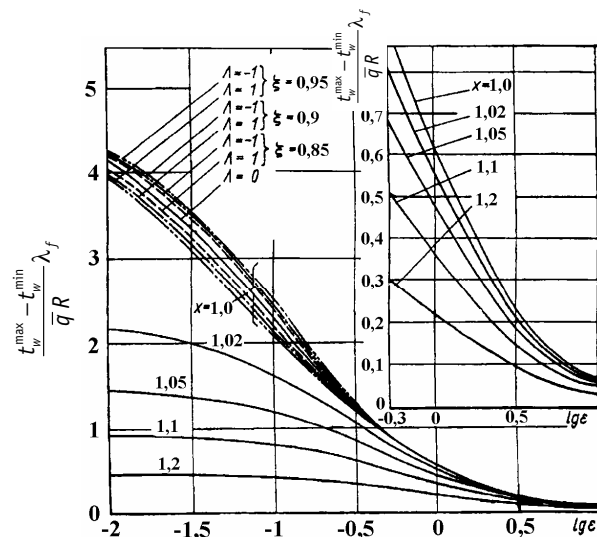


Рис. 5. Номограмма для определения максимальной неравномерности температуры твэлов квадратной решетки при ламинарном течении теплоносителя: $\Lambda = (\lambda_w - \lambda_r) / (\lambda_w + \lambda_r)$; $x = s/d$; $\xi = R_1/R$; $\varepsilon = \varepsilon_4$

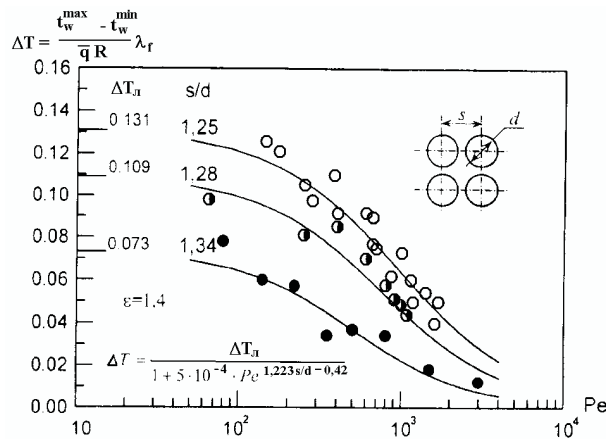


Рис. 6. Экспериментальные данные по неравномерностям температуры центральных твэлов ТВС реактора БРЕСТ-ОД-300

5). Для получения обобщенной формулы типа (6) необходимо проведение экспериментов для разных ε и s/d применительно к квадратной решетке твэлов.

На рисунке 6 показаны опытные данные по неравномерностям температуры для твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 [10].

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ НА ТЕПЛОБМЕН И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ТВЭЛОВ

Обзор и анализ имеющихся работ по переменному энерго-

выделению сделан в [26, 27].

Для пересчета температурного поля, полученного при постоянном энерговыделении, на переменное используется интеграл Дюамеля [16], построенный на принципе суперпозиции, вытекающем из факта линейности уравнения энергии относительно температуры:

$$t(z) = Q(0)t_{q_1}(z) + \int_0^z \frac{dQ(z')}{dz'} t_{q_1}(z-z') dz',$$

где $Q(z)$ – функция распределения теплового потока по длине канала; $t_{q_1}(z)$ – распределение температуры по длине канала при единичном скачке энерговыделения (функция влияния); $Q(0)$ – начальное энерговыделение (в точке $z = 0$), постоянное по длине канала (начальный скачок).

Удобным и простым соотношением для учета переменного энерговыделения, вытекающим из интеграла Дюамеля, является соотношение для температурного напора «стенка-жидкость» [17]:

$$\Delta t(z) = \frac{q(z-L)}{\alpha}, \quad (13)$$

где $q(z-L)$ – переменное по z энерговыделение; L – длина релаксации, связанная с длиной начального теплового участка соотношением

$$L = l_{н.т.}/3, \quad (13a)$$

α – коэффициент теплоотдачи при постоянном по длине канала энерговыделении.

Использование (13) предполагает знание длин начальных тепловых участков $l_{н.т.}$ при $q = \text{const}$ по длине z . В последнее время значения $l_{н.т.}$ обобщены для различных каналов в [28].

Для треугольной решетки твэлов данные по $l_{н.т.}$ получены из численного решения задачи о температурном поле в характерной ячейке «бесконечной» решетки твэлов при турбулентном [18], стержневом [19, 20] и ламинарном [21] течении теплоносителя (*гидродинамически стабилизированные условия*).

Длина $l_{н.т.}$ определялась в предположении, что число Нуссельта на начальном участке отличается от стабилизированного значения не более чем на 2%. Систематизация результатов проведена в [3].

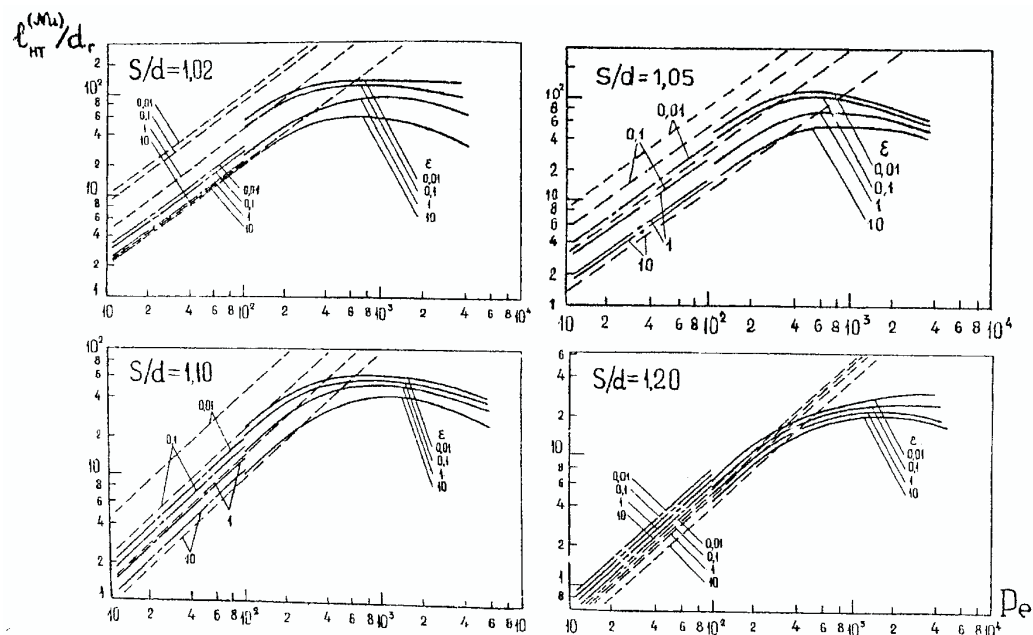


Рис. 7. Зависимость относительных длин начальных участков в решетках твэлов от числа Пекле при турбулентном (—) [18], ламинарном (— • —) [21] и стержневом (— — —) [19, 20] течениях теплоносителя для гидродинамически стабилизированного течения

На рисунке 7 сопоставляются расчетные данные для вышеупомянутых режимов течения в решетках твэлов с $s/d = 1,02; 1,05; 1,10; 1,20$ при различных ε . Изменение коэффициентов теплоотдачи и неравномерностей температуры по периметру твэлов на начальных участках решеток твэлов, обтекаемых турбулентным, стержневым и ламинарным потоками теплоносителя, описывается универсальной формулой

$$\frac{F(X)}{F_{\text{стаб}}} = 1 - \left[p(50p)^{-\frac{X}{X_{\text{н.т.}}}} + (1-p)(50p)^{-\frac{4X}{X_{\text{н.т.}}}} \right], \quad (14)$$

где $F(X)$ – значение функций $F_1(X) = \frac{1}{\text{Nu}}$ и $F_2(X) = \frac{t_w^{\text{max}} - t_w^{\text{min}}}{\bar{q} R} \lambda_f$ на начальном участке; $F_{\text{стаб}}$ – значение функций $F_1(X)$ и $F_2(X)$ в стабилизированной области теплообмена; $X_{\text{н.т.}, \text{Nu}} = \frac{l_{\text{Nu}}}{R \text{Pe}'}$ – безразмерная длина начального теплового участка по числу Нуссельта; $X_{\text{н.т.}, t} = \frac{l_t}{R \text{Pe}'}$ – безразмерная длина начального теплового участка по максимальной неравномерности температуры; \bar{q} – средний по периметру твэла тепловой поток на поверхности твэла; R – радиус твэла, $\text{Pe}' = \frac{\bar{w} R}{a} = \frac{1}{2} \frac{d}{d_r} \text{Pe}$ – число

Пекле $\left(\text{Pe} = \frac{\bar{w} d_r}{a} \right)$; $d = 2R$ – диаметр твэла, \bar{w} – средняя в ячейке скорость теплоносителя, $p(\varepsilon_6, s/d)$ – некоторые функции ε_6 и s/d ; $X = \frac{z}{R \text{Pe}'}$ – безразмерная продольная координата. Диапазон применимости формулы (14) для турбулентного течения: $1,02 \leq s/d \leq 2,0$; $0,01 \leq \varepsilon_6 \leq 10$; $100 \leq \text{Pe} \leq 2500$.

Значения $X_{h.t.Nu}$ и $X_{h.t.l}$ а также функции $p(\varepsilon_6, s/d)$ берутся по соответствующим графикам РТМ [3].

Формулу (14) для раздвинутых решеток твэлов можно представить в виде переходной функции для температурного напора стенка-жидкость:

$$\theta(z) = 1 - \left[p(50p)^{\frac{4z}{l_{h.t.}}} + (1-p)(50p)^{\frac{4z}{l_{h.t.}}} \right], \quad (15)$$

а значения $\frac{l_{h.t.}}{d_\Gamma}$ аппроксимировать формулой [22]

$$\frac{l_{h.t.}}{d_\Gamma} = f\left(\frac{s}{d}\right) \varphi(Pe) \psi(\varepsilon_6), \quad (1,25 \leq s/d \leq 1,7; 0,1 \leq \varepsilon_6 \leq 10; 100 \leq Pe \leq 2500), \quad (16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} f\left(\frac{s}{d}\right) &= \left[0,0952 - 0,2858\left(\frac{s}{d}\right) + 0,2086\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 0,0028\left(\frac{s}{d}\right)^3 \right] \cdot \left[4\left(\frac{d_\Gamma}{d}\right)^2 \right]^{-1} \\ \varphi(Pe) &= Pe \cdot \exp\left(-\frac{Pe}{2500}\right) \\ \psi(\varepsilon_6) &= \varepsilon_6 \exp\left[-0,00455/\left(\frac{s}{d}-1\right)\right], \\ p &= \sqrt{\frac{s}{d}-1} - \sqrt{\lg Pe} \left[0,4455 + 4 \cdot 10^{-3} \left(1,7 - \frac{s}{d}\right) \sqrt{Pe} \right] \varepsilon_6 \exp\left[-0,1\left(1,7 - \frac{s}{d}\right)\right] \\ \frac{d_\Gamma}{d} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1 \end{aligned} \right\} \quad (16a)$$

Гидродинамически нестабилизированное течение. Длина начальных тепловых участков по коэффициентам теплоотдачи (рис. 8) рассчитывается по соотношению [23–25] (материалы обобщены в [3]):

$$\left(\frac{l_{h.t.}}{d_\Gamma}\right)_{Nu} = A - \frac{B}{255 + Pe}, \quad (17)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= 156,2 - 102,4\left(\frac{s}{d}\right), \\ B &= \left\{ 51 - 34,5\frac{s}{d} - 4 \exp\left[-14,27\left(\frac{s}{d}-1\right)\right] \right\} \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \text{ для } 1,0 \leq \frac{s}{d} \leq 1,2; \quad (17a)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= 95\left(\frac{s}{d}\right)^{-5,8} \\ B &= 25,3\left(\frac{s}{d}\right)^{-5,6} \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \text{ для } 1,2 \leq \frac{s}{d} \leq 1,7. \quad (17b)$$

Интервалы применимости формулы (15)

- по параметру ε_6 : $0,4 \leq \varepsilon_6 \leq 1,0$ при $1,0 \leq s/d \leq 1,2$; $0,4 \leq \varepsilon_6 \leq 1,6$ при $1,2 \leq s/d \leq 1,7$;

- по числу Пекле: $15 \leq Pe \leq 800$ для $s/d = 1,0$; $50 \leq Pe \leq 3000$ для $1,10 \leq s/d \leq 1,7$.

Для «тесных» решеток высокотеплопроводных твэлов ($s/d \leq 1,1$; $\varepsilon_6 \cong 10-15$)

длину начального теплового участка, определенную по формуле (17), уменьшают на 30–40%.

Расчет длин начальных тепловых участков по неравномерностям температуры проводится по формуле

$$\left(\frac{l_{н.т.}}{d_r}\right)_t \cong \left(\frac{l}{d_r}\right)_{Nu} \cdot (18,1 - 4,5 \lg Pe) \left(\frac{s}{d} - 1\right) + 1; \quad (18)$$

$1,0 \leq s/d \leq 1,2$; $500 \leq Pe \leq 2000$; $0,4 \leq \varepsilon_6 \leq 1,0$.

Для квадратной решетки твэлов в условиях гидродинамически стабилизированного течения использование интеграла Дюамеля дает следующее выражение для числа Нуссельта при переменном энерговыделении [22]:

$$Nu_v = Nu_\infty \frac{q(z)}{q\left(z - \frac{l_{н.т.}}{3}\right)}, \quad (19)$$

где Nu_∞ – стабилизированное число Нуссельта для локального теплового потока q в данной точке канала в предположении, что q остается постоянным по длине канала.

По методу эквивалентного кольца пересчитываются данные для треугольной решетки с относительным шагом $(s/d)_{кв}$ при использовании формулы

$$\left(\frac{s}{d}\right)_{тр.} = 1,075 \left(\frac{s}{d}\right)_{кв.}, \quad (20)$$

вытекающей из предположения о равенстве гидравлических диаметров треугольной и квадратной ячеек твэлов.

В итоге получаем

$$\frac{l_{н.т.}}{d_r} = f'\left(\frac{s}{d}\right) \varphi(Pe) \psi'(\varepsilon_4), \quad (21)$$

где

$$f'\left(\frac{s}{d}\right) = \left[0,0952 - 0,3073 \left(\frac{s}{d}\right) + 0,2411 \left(\frac{s}{d}\right)^2 - 0,0036 \left(\frac{s}{d}\right)^3 \right] \cdot \left[4 \left(\frac{d_r}{d}\right) \right]^{-1}, \quad (21a)$$

$$\psi'(\varepsilon_4) = \varepsilon_4 \exp \left[-0,00455 / \left(1,075 \frac{s}{d} - 1,1 \right) \right]. \quad (21b)$$

В формуле (15) вместо p берется p' :

$$p' = \sqrt{1,075 \frac{s}{d} - 1} \cdot \sqrt{\lg Pe} \left[0,4455 + 4 \cdot 10^{-3} \left(1,7 - 1,075 \frac{s}{d} \right) \sqrt{Pe} \right] \times \\ \times \varepsilon_4 \exp \left[-0,1 \left(1,7 - 1,075 \frac{s}{d} \right) \right], \quad (21b)$$

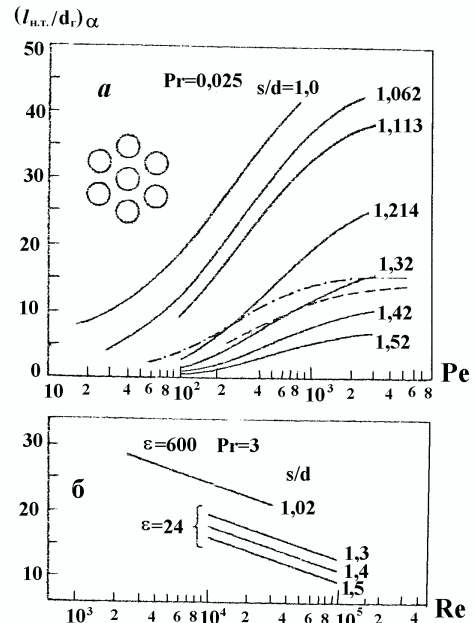


Рис. 8. Зависимость относительных длин начальных тепловых участков в решетках твэлов от чисел Пекле и Рейнольдса для теплоносителей с малыми (а) и умеренно большими (б) числами Прандтля (результаты экспериментов для гидродинамически нестабилизированного течения): — • —, — — — данные для круглых труб

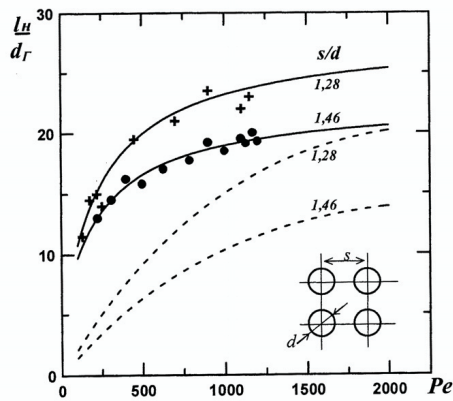


Рис. 9. Зависимости относительных длин начальных тепловых участков от числа Пекле в сборках с различными относительными шагами твэлов: +, • – экспериментальные данные для $s/d = 1,28$ и $1,46$ соответственно; — — — расчет по формуле (22); — — — расчет по формуле (21)

$$\frac{d_r}{d} = 4\pi \left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1, \quad \varphi(Pe) - \text{см. (16a)}.$$

Переходная функция для температурного напора «стенка – жидкость» $\theta(z)$ определяется по (15) при использовании (21) для $\frac{l_{н.т.}}{d_r}$ и (21в) для p' .

Для гидродинамически нестабилизированного течения начальные тепловые участки в ограниченной области s/d описываются формулой [22]:

$$\frac{l_{н.т.}}{d_r} = A - \frac{B}{255 + Pe}, \quad (22)$$

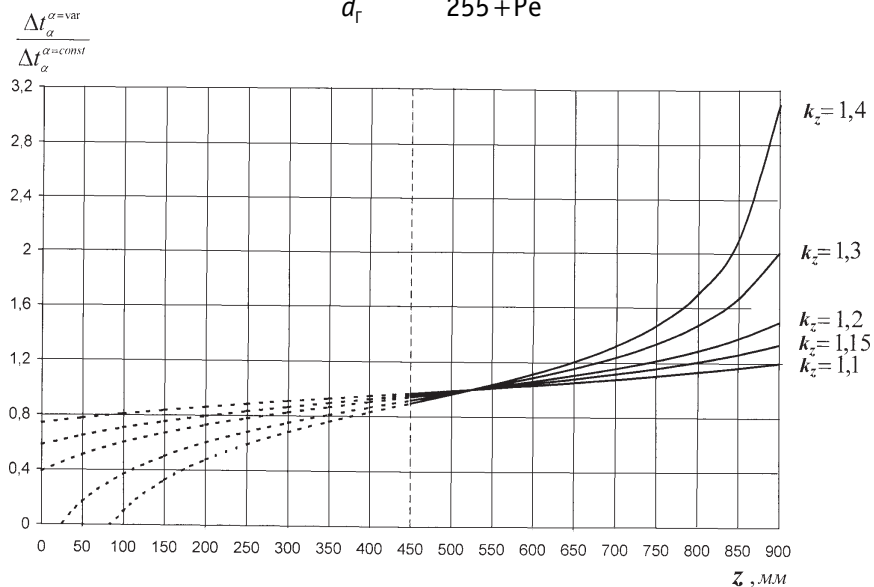


Рис. 11. Эффект от переменного энерговыделения в отношении Δt_α для реактора с тяжелым теплоносителем СВБР-75/100 (пристенные твэлы); $\Delta t_\alpha^{\alpha=var}$, $\Delta t_\alpha^{\alpha=const}$ – температурные напоры «стенка – жидкость» с учетом и без учета переменного энерговыделения соответственно

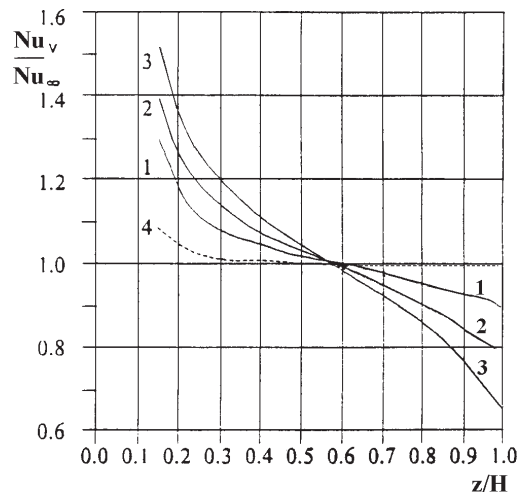


Рис. 10. Распределение относительных чисел Нуссельта по высоте активной зоны реактора БРЕСТ ОД-300 для $s/d=1,3$ и $Pe=1600$ в функции значения k_z : 1 – 1,1; 2 – 1,2; 3 – 1,3; 4 – Nu_∞ – стабилизированное число Нуссельта при $q=\text{const}$

где

$$A = 42,3 \left(\frac{s}{d} \right)^{-1,66}, \quad B = 10680 \left(\frac{s}{d} \right)^{-2,24}, \quad 100 \leq Pe \leq 2000; \quad 1,28 \leq s/d \leq 1,46.$$

Переходная функция для безразмерного перепада температуры «стенка-жидкость» при $q=\text{const}$ ($\varepsilon_4 = 1,4$) [22]

$$\theta = \left[th \left(2,3 \frac{z}{l_{н.т}} \right) \right]^{1 + \frac{z}{l_{н.т}}}, \quad 1,28 \leq s/d \leq 1,46; \quad 300 \leq Pe \leq 1000 \quad (23)$$

На рисунке 9 дается графическая интерпретация формул (21), (22), а на рис. 10 демонстрируется эффект от переменного энерговыделения для реакторов со свинцовым охлаждением (квадратная решетка).

Для квадратной решетки твэлов экспериментальные исследования длин начальных тепловых участков требуют развития, т.к. они ограничены лишь раздвинутыми решетками твэлов.

Эффект от переменного энерговыделения для реакторов с тяжелым теплоносителем существенно больше, чем для натриевых реакторов (особенно для пристенных твэлов (рис. 11), и его необходимо тщательно оценивать ввиду заметного влияния этого эффекта на максимальную температуру твэлов [26].

Литература

1. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М., Сорокин А.П. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением/Под редакцией А.В. Жукова. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). – М.: Атомиздат, 1975.
3. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л., Кузавков Н.Г., Ушаков П.А. и др. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов/Под редакцией А.В. Жукова, А.П. Сорокина. – ГКИАЭ, РГМ 1604.008-88, 1988, ФЭИ, 435 с.
4. Ушаков П.А. Приближенное тепловое моделирование цилиндрических тепловыделяющих элементов/В сб. «Жидкие металлы». – М.: Атомиздат, 1967. – С. 137-148.
5. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 3. Теплоотдача и температурные поля твэлов в регулярных решетках (однофазное течение: эксперимент – расчет, методики и формулы), Т. 1. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2006. – С. 559.
6. Ушаков П.А., Жуков А.В., Матюхин Н.М. Теплоотдача к жидким металлам в правильных решетках твэлов//Теплофизика высоких температур. – 1977. – Т. 15. – № 5. – С. 1027-1043.
7. Ушаков П.А., Жуков А.В., Матюхин Н.М. Азимутальные неравномерности температуры твэлов, расположенных в правильных решетках, при турбулентном течении жидких металлов//Теплофизика высоких температур. – 1977. – Т. 15. – № 1. – С. 76-83.
8. Жуков А.В., Кудрявцева Л.К., Свириденко Е.Я. и др. Экспериментальное исследование на моделях полей температур тепловыделяющих элементов/В кн.: Жидкие металлы. – М.: Атомиздат, 1967. – С. 170-193.
9. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Номофилов Е.В. и др. Температурные поля в нестандартных и деформированных решетках твэлов быстрых реакторов. Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов. – Прага: ОНТИ ЧСКАЭ, 1978. – С. 132-145.
10. Кузина Ю.А. Теплогидравлическое моделирование в обоснование активных зон реакторов типа БРЕСТ: дисс. канд. техн. наук, ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2003.
11. Zhukov A.V., Kuzina Yu.A., Sorokin A.P., Leonov V.N., Smirnov V.P., Sila-Novitskii A.G. An Experimental Study of Heat Transfer in the Core of BREST-OD-300 Reactor with Lead Cooling on Models Thermal Engineering (Teploenergetika), vol. 49, №3, 2002 (English Translation of Teploenergetika), p.2-10.

12. Ушаков П.А., Субботин В.И., Габрианович Б.Н. и др. Теплопередача и гидравлическое сопротивление в плотно упакованных коридорных пучках стержней//Атомная энергия. 1962. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 162-169.
13. Кузина Ю.А., Жуков А.В., Шкреттан М.В. Обобщенная зависимость по теплоотдаче в квадратных решетках твэлов реакторов с повышенной безопасностью: Тезисы докл. X Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Обнинск: ИАТЭ, 2007.
14. Filin A.I., Zhukov A.V., Kuzina Yu.A. and al. Thermohydraulic Research for the core of BREST-OD-300 Reactor, 11th International Conference on Nuclear Engineering (Tokyo, Japan, April 20-23, 2003) «ICONE 11-36407».
15. Кузина Ю.А., Сила-Новицкий А.Г. Модельные эксперименты и расчеты (код ТИГР-БРС) по изучению полей температуры и скорости в активных зонах реакторов с тяжелым теплоносителем//Теплоэнергетика. – 2002. – № 11. – С. 71-80.
16. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Госуд. изд. технико-теорет. литературы, 1952.
17. Губарев В.А., Трофимов А.С. Определение температурного напора стенка-жидкость при тепловом расчете реактора//Атомная энергия. – 1974. – Т. 37. – Вып. 3. – С. 251.
18. Жуков А.В., Кириллова Г.П. Расчет температурных полей на начальном участке решеток твэлов, обтекаемых турбулентным потоком жидкометаллического теплоносителя/Препринт ФЭИ-715. – Обнинск, 1975.
19. Сидельников В.Н., Жуков А.В. Расчет температурных полей на начальном участке решеток твэлов и анализ влияния переменного энерговыделения (плоское течение теплоносителя)/Препринт ФЭИ-414. – Обнинск, 1972.
20. Сидельников В.Н., Жуков А.В. Вопросы теплообмена на входном участке пучков твэлов. Доклад на семинаре «Теплопередача и гидродинамика в активных зонах и парогенераторах быстрых реакторов, охлаждаемых натрием». – Новое Место, ЧССР, 1973.
21. Жуков А.В., Сидельников В.Н., Титов П.А. Расчет температурных полей на начальном участке решеток твэлов (ламинарное течение)/Препринт ФЭИ-491. – Обнинск, 1974.
22. Жуков А.В., Сорокин А.П., Папандин М.В., Смирнов В.П. Влияние переменного энерговыделения на коэффициент теплоотдачи в квадратных решетках//Атомная энергия. – 1993. – Т. 24. – Вып. 3.
23. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Котовский Н.А. и др. Экспериментальное исследование температурных полей на начальном участке пучков стержней, обтекаемых турбулентным потоком жидкометаллического теплоносителя (при совместной гидродинамической и тепловой стабилизации)/Препринт ФЭИ-781. – Обнинск, 1977.
24. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Котовский Н.А. Температурные поля на начальных участках и в стабилизированной зоне теплообмена раздвинутых пучков стержней при совместной гидродинамической и тепловой стабилизации (жидкометаллическое охлаждение)/Препринт ФЭИ-883. – Обнинск, 1978.
25. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Котовский Н.А. и др. Экспериментальное и расчетное исследование теплообмена в решетках твэлов при нестабилизированных условиях/В кн.: Теплообмен и гидродинамика однофазного потока в пучках стержней. – Л.: Наука, 1979. – С. 108-112.
26. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 5. Переменное энерговыделение в теплогидравлике реакторов. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2009. – 177 с.
27. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. О некоторых подходах к изучению влияния переменного энерговыделения на теплоотдачу и температурные поля твэлов реакторов//Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика ядерных реакторов». Вып. 3. Динамика и безопасность ядерных энергетических установок. – М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2008. – С. 21-30.
28. Жуков А.В., Кузина Ю.А. Систематизация начальных тепловых участков в различных каналах при течении жидких металлов. Доклад на межведомственном семинаре «Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами» (Теплофизика-2008): Тезисы докладов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2008. – С. 85-87.

Поступила в редакцию 1.09.2009

The paper presents the results of experimental investigation of changes in physical characteristics of the SM reactor core in the course of its conversion to new fuel with the increased content of U-235 in a fuel rod. The methodical peculiarities of the experiments are described. The functional dependences and values of the temperature and power coefficients of reactivity have been determined as well as the effectiveness and calibration characteristics of the control rods and reactivity effects when reloading the fuel assemblies. The performed micro-runs have been analyzed in terms of the feasibility of the reactor with pilot fuel assemblies. Data have been obtained to introduce changes into the reactor design documents and to revise the safety analysis. Based on the obtained results, the recommendations have been made on the possibility to use the new pilot fuel assemblies as standard ones.

УДК 621.039.52:615.849.1

Subcritical Systems for Neutron Therapy: Simulation Techniques & Performance Criteria \Yu.A. Kurachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 11 titles.

Simulation techniques based on combined transport codes application to new neutron facilities beams are proposed. «In air» & «in phantom» characteristics of the facilities are optimized for the neutron capture therapy. It is displayed that new facilities provide absolute safety, simplicity of technology and exploiting; they are highly competitive with these existing and designing ones for the neutron capture therapy.

УДК 621.039.553.34

Status of Study on Heat Transfer in Fuel Pin Bundles and Some Problems of Liquid-Metal Cooling \A.V. Zhukov, J.A. Kuzina, A.P. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 14 pages, 1 table, 11 illustrations. – References, 28 titles.

Data on heat transfer and temperature fields of fuel pins in triangular and square lattices with liquid-metal cooling are systematized. Necessity of detailed additional studies for square pin lattices is emphasized.

УДК 621.039.51:536.248.2

The generalize of Experimental Data on the Critical Heat Flux in the Clusters with Triangular Disposition of Rods \A.A. Ivashkevitch; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables. – References, 18 titles.

The correlation for the critical heat flux in form $q_{кр} = x_{bx} L_k$ in the uniformly heated clusters with the triangular disposition of the rods is obtained. As compared with the early suggested correlations the proposed correlation generalizes the experimental data in the more broad diapasons of the regime parameters and with smaller standard deviation.

УДК 621.039.58:532.529.5

Experimental Study of Non-equilibrium Thermal-hydraulic Processes in a Passive VVER Core Reflooding System \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 5 titles.

The paper presents the results of experimental investigations of the interaction between saturated steam and cold water at its flowing out from a vertical tube of the passive VVER core reflooding system from the second-stage hydroaccumulators. A physical model of the process of water outflow into countercurrent saturated steam flow in a vertical blanked-off tube with a variable level has been proposed. The semi-empirical correlation has been obtained for calculating the time of discharge from vertical blanked-off tubes.

УДК 621.039.58:536.423

Experimental Measurement of the Thermal Capacity of the VVER Steam Generator Model in Condensation Mode in the Event of the Beyond Design Basis Accident \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok, D.S. Kalyakin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 4 titles.

The experimental measurement of the thermal capacity of the VVER steam generator model in