

ФЭИ-1396

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

*О. Д. КАЗАЧКОВСКИЙ, А. В. ЖУКОВ, Н. М. МАТЮХИН,
А. П. СОРОКИН, К. С. РЫМКЕВИЧ*

**Интенсификация теплообмена
в сборках твэлов быстрых реакторов
с противонаправленными проволочными навивками
при неравномерном по сечению сборок
энерговыделении**

УДК 621.039.517.5

О. Д. Казачковский, А. В. Жуков, Н. М. Матюхин, А. П. Сорокин,
К. С. Рымкевич.

Интенсификация тепломассообмена в сборках твэлов быстрых реакторов с противонаправленными проволочными навивками при неравномерном по сечению сборок энерговыделении.

ФЭИ-1396. Обнинск: ФЭИ, 1983. — 30 с.

Излагаются результаты экспериментальных исследований коэффициентов межканального перемешивания и температурных полей в модельных сборках твэлов с противонаправленными и однонаправленными проволочными навивками на имитаторах твэлов применительно к активным зонам быстрых реакторов при переменном по сечению сборок энерговыделении (энерговыделение одного твэла, линейный характер энерговыделения по сечению сборок). Рассматривается вариант дистанционирования твэлов с чередованием гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками, а также вариант оребрения твэлов противонаправленными навивками по рядам твэлов. Демонстрируются большие эффекты по выравниванию неравномерностей в подогревах теплоносителя и температуры по периметру твэлов противонаправленными навивками. Приводятся эмпирические формулы по оценкам максимальных неравномерностей температуры характерных твэлов, расположенных в центральной и пристенной зонах касеты.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с программой работ по быстрым реакторам в СССР [1] предусматривается дальнейшее развитие теплогидравлических исследований по оптимизации температурных режимов активных зон быстрых реакторов.

Неравномерное энерговыделение по сечению кассет твэлов быстрых реакторов (особенно для кассет, расположенных у экранов), образование горячих пятен вследствие систематических и статистических неоднородностей по топливу, допускам на изготовление и размещение твэлов в решетке, деформации решетки при эксплуатации реактора (прогибы, смещения, распухания твэлов при больших выгораниях и т.д.) вызывают необходимость выравнивания температуры по сечению кассет твэлов. Представляется перспективным использование для этих целей противонаправленных навивок на твэлах, приводящих к интенсификации теплообмена по сравнению с однонаправленными навивками при уменьшении гидравлического сопротивления по сборкам твэлов [2].

Ниже излагаются результаты теплогидравлических исследований для двух вариантов винтового оребрения твэлов, связанных с использованием противонаправленных навивок: чередование гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками на соседних твэлах, противонаправленное оребрение твэлов по соседним рядам. Результаты исследований сопоставляются с экспериментальными данными для обычного (ныне используемого в быстрых реакторах) варианта дистанционирования твэлов однонаправленными проволочными навивками.

I. КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕЖКАНАЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В РЕШЕТКАХ ТВЭЛОВ С ПРОТИВОНАПРАВЛЕННЫМИ НАВИВКАМИ

Основной особенностью межканального обмена в решетках твэлов с противонаправленными навивками является более интенсивное перемешивание теплоносителя по отдельным зазорам характерной ячейки, чем в случае однонаправленного оребрения твэлов [2,3] - рис. 1. Более высокие значения коэффициентов перемешивания обусловлены тем, что поперечная составляющая скорости не меняет своего знака по длине зазоров (рис. 2) и профиль скорости имеет более заполненный вид, чем при однонаправленном оребрении, когда поперечная составляющая скорости изменяется либо по синусоидальному закону (дистанционирование

твэллов "ребро по оболочке" - обмен по всему зазору между твэллами), либо по более сложному закону (дистанционирование твэллов "ребро по ребру" - обмен в пристенных слоях у поверхности твэллов).

При чередовании гладких и оребренных твэллов с противонаправленными навивками интенсивность обмена через зазор между твэллами с противонаправленными навивками в два раза больше, чем через два других зазора (между гладким и оребренными твэллами). Коэффициенты перемешивания в зазорах с меньшей интенсивностью обмена примерно равны коэффициентам перемешивания при дистанционировании твэллов однонаправленными навивками типа "ребро по ребру" :

$$\mu_{\text{конв}}^{\Gamma} = \frac{1}{3h} [3,75x - 3,19 e^{-1100(x-1)^4} - 0,64] \Psi(\text{Re}) \quad [1/\text{м}] \quad (1)$$

$$1,01 \leq x \leq 1,4; \quad 5 \leq h/d \leq 65; \quad 5 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^5$$

где $\Psi(\text{Re}) = 1,085 - 0,754 \exp(-0,132 \cdot 10^{-3} \text{Re})$. (1-a)

При дистанционировании твэллов противонаправленными по рядам твэллов навивками коэффициенты перемешивания в двух зазорах ячейки в два раза больше, чем в третьем зазоре. Коэффициенты перемешивания в зазоре с меньшей интенсивностью обмена примерно равны коэффициентам перемешивания при дистанционировании твэллов однонаправленными навивками типа "ребро по оболочке":

$$\mu_{\text{конв}}^{\Gamma} = \frac{1}{3h} [2,57x - 3,57 e^{-110(x-1)^{2,12}} + 1] \Psi(\text{Re}) \quad [1/\text{м}] \quad (2)$$

$$1,01 \leq x \leq 1,4; \quad 2 \leq h/d \leq 50; \quad 2 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 2 \cdot 10^5$$

Разница в коэффициентах перемешивания по зазорам ячейки в два раза является не случайной, так как в зазоре с повышенной интенсивностью обмена направленный поток теплоносителя создается двумя ребрами, а в зазоре с пониженной интенсивностью - одним ребром.

Таким образом расчет коэффициентов перемешивания для различных типов противонаправленного винтового оребрения твэллов следует проводить по формулам (1), (2), умножая полученные результаты на 2 для зазоров с повышенной интенсивностью обмена.

Большую практическую важность представляет вопрос о затрачиваемой мощности на прокачку теплоносителя при различных способах винтового оребрения стержней. Экспериментально показано, что мощность, требуемая на прокачку теплоносителя при разнонаправленном оребрении

стержней примерно на 10 % меньше, чем при однонаправленном оребрении стержней [2].

2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В СБОРКАХ ТВЭЛОВ С ПРОТИВОНАПРАВЛЕННЫМИ НАВИВКАМИ

2.1. Экспериментальные модели

Эксперименты проводятся на теплогидравлических моделях кассет твэлов быстрых реакторов типа БН-350 (рис. 3-а), состоящих из 37-и имитаторов твэлов (трубки из стали Х18Н10Т с нихромовыми спиральными нагревателями и с засыпкой из окиси алюминия), расположенных в треугольной решетке и заключенных в шестигранную обечайку. Геометрические размеры моделей приводятся в таблице № I.

Дистанционирование имитаторов твэлов осуществляется навивками из проволоки, диаметр которой равен величине зазора между имитаторами ($S - d$) в центральной зоне моделей и половине величины зазора между имитаторами ($\frac{S-d}{2}$) в пристенной зоне моделей.

Используется несколько вариантов дистанционирования имитаторов: чередование гладких и оребренных имитаторов с противонаправленными (левые, правые) навивками на соседних имитаторах (рис. 4-а); оребрение всех имитаторов с чередованием противонаправленных навивок по рядам имитаторов (рис. 4-б); оребрение всех имитаторов однонаправленными навивками (рис. 4-в).

Имитаторы твэлов, расположенные в характерных зонах моделей (центральной, боковой, угловой) оснащаются двенадцатью термопарами каждый (метод заделки термопар - металлизация в продольных пазах) и выполняются поворотными, что позволяет измерять распределения температуры по периметру имитаторов, не нарушая режима работы модели.

Поворот осуществляется в неподвижных проволочных спиральях, прикрепленных к верхней и нижней центрирующим решеткам пучка и прилегающих к поверхности имитаторов при натяге спиралей (в случае чередования гладких и оребренных имитаторов центральный и угловой имитаторы с термопарами не имеют спиралей).

Остальные (неповоротные) имитаторы имеют навивки, приваренные к поверхности имитаторов точечной сваркой.

Энерговыведение осуществляется либо от одного (центрального)

имитатора твэла, либо от всех имитаторов твэлов, когда воспроизводится с помощью добавочных сопротивлений, включенных в цепь имитаторов, линейный характер энерговыделения по сечению моделей с максимальным и минимальным энерговыделениями по угловым имитаторам (№ 19 и № 3, соответственно; $q^{\max}/q^{\min} \approx 1,6$ - рис. 3-б):

$$q = q^{\max} \left(1 - 0,375 \cdot \frac{L}{L_0} \right) \quad (3)$$

где L - текущее расстояние от центра углового имитатора с максимальным энерговыделением в направлении диагонали шестигранника, L_0 - расстояние между центрами угловых имитаторов.

Закономерность (3) отражает характер энерговыделения по сечению кассет твэлов быстрых реакторов в областях, прилежащих к крайним сборкам.

Температура теплоносителя (натрия) измеряется на выходе из каждой ячейки моделей с помощью термопар в капиллярах.

2.2. Поля температуры при одиночном энерговыделении центрального имитатора твэла

Распределения температуры жидкости по радиусу модельных сборок твэлов при одиночном энерговыделении центрального имитатора твэла неодинаковы для случаев однонаправленного оребрения имитаторов и чередования гладких и оребренных имитаторов с противоположенными навивками, когда центральный имитатор является гладким (рис. 5). Во-втором случае профиль температуры более заполненный: подогрев теплоносителя в окружающих имитатор ячейках (№ 1) ниже (примерно на 60 %), а в последующих рядах ячеек (№ 4+9) выше, чем при однонаправленном оребрении имитаторов. Это свидетельствует о более интенсивных растечках тепла, чем в случае однонаправленных навивок.

Действительно, через зазоры между твэлами с противоположенными навивками происходит подток теплоносителя к ячейкам, окружающим гладкий твэл (три зазора), или отток теплоносителя от окружающих ячеек (три зазора - см. схему на рис. 6). В результате по периметру одиночно энерговыделяющего гладкого твэла возникают неравномерные распределения температуры с тремя максимумами и тремя минимумами, обусловленными чередованием перемешивающихся "холодных" и "горячих" потоков жидкости (рис. 6).

Наряду с экспериментальными данными демонстрируются результаты расчетов, полученные с использованием поканальной методики [4], согласно которой решается система уравнений баланса энергии для каналов, на которые разбивается модельная сборка твэлов.

Уравнение баланса энергии для характерного центрального канала сборки с однонаправленными навивками на имитаторах твэлов имеет вид:

$$\frac{d}{dz} (\rho c_p w_i t_i \omega_i) = \sum_{k=1}^3 \alpha_{ik} \Pi_{ik} + \sum_{j=1}^3 (\mu_{MT}^T + \mu_{конв}^T + \mu_{\epsilon}^T) \rho \cdot c_p \frac{w_i + w_j}{2} (t_j - t_i) \omega_0 \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta S_0}, \quad (4)$$

где ρ , c_p - плотность и теплоёмкость теплоносителя, ω - площадь проходного сечения канала, Π_{ik} - смоченный периметр K -го твэла в i -ом канале, W - средняя скорость теплоносителя в канале, t - средняя температура теплоносителя в канале, μ^T - тепловой коэффициент межканального обмена, ΔS - ширина зазора между имитаторами твэлов, z - продольная координата, i, j - индексы каналов, K - индекс твэла, MT - обозначение молекулярно-турбулентного обмена, ϵ - обозначение обмена за счет теплопроводности твэлов, 0 - индекс центрального канала со средними параметрами.

Расчет коэффициентов μ_{MT}^T и μ_{ϵ}^T проводится по формулам из работ [5] и [6]. Тепловые конвективные коэффициенты межканального обмена $\mu_{конв}^T$, равные гидродинамическим коэффициентам межканального обмена, умноженным на коэффициент неэквивалентности переноса тепла и массы:

$$\mu_{конв}^T = \beta \cdot \mu_{конв}^G \quad (5)$$

рассчитываются с использованием формулы (2). Для решеток твэлов, обтекаемых жидкими металлами, можно приближенно считать $\beta = 0,7$ [5].

В случае чередования гладких и оребренных имитаторов с противоположенными навивками на соседних имитаторах уравнения баланса

энергии для центральных каналов записываются в виде (рис. 4-а):
для первого типа каналов (I)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} (\rho C_p W_i t_i \omega_i) = & \sum_{k=1}^3 q_k \Pi_{ik} + \int_{\text{конв}_1}^T \rho C_p \frac{W_1+W_1}{2} t_1 \frac{\Delta S_{11}}{\Delta S_0} \omega_0 - \\ & - \sum_{j=2}^3 \int_{\text{конв}_2}^T \rho C_p \frac{W_1+W_2}{2} t_i \omega_0 \frac{\Delta S_{1j}}{\Delta S_0} + \\ & + \sum_{j=1}^3 (\int_{\text{MT}}^T + \int_{\text{E}}^T) \rho C_p \frac{W_1+W_j}{2} (t_j - t_i) \omega_0 \frac{\Delta S_{1j}}{\Delta S_0}, \end{aligned} \quad (6)$$

для второго типа каналов (II)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} (\rho C_p W_i t_i \omega_i) = & \sum_{k=1}^3 q_k \Pi_{ik} - \int_{\text{конв}_1}^T \rho C_p \frac{W_1+W_1}{2} t_i \omega_0 + \\ & + \sum_{j=2}^3 \int_{\text{конв}_2}^T \rho C_p \frac{W_1+W_j}{2} t_j \omega_0 \frac{\Delta S_{1j}}{\Delta S_0} + \\ & + \sum_{j=1}^3 (\int_{\text{MT}}^T + \int_{\text{E}}^T) \rho C_p \frac{W_1+W_j}{2} (t_j - t_i) \omega_0 \frac{\Delta S_{1j}}{\Delta S_0}. \end{aligned} \quad (6-a)$$

Для разнонаправленных навивок по рядам имитаторов уравнение баланса энергии выглядит (рис. 4-б):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} (\rho C_p W_i t_i \omega_i) = & \sum_{k=1}^3 q_k \Pi_{ik} + \int_{\text{конв}_1}^T \rho C_p \left[\frac{W_1+W_2}{2} t_2 \frac{\Delta S_{12}}{\Delta S_0} - \right. \\ & \left. - \frac{W_1+W_1}{2} t_1 \frac{\Delta S_{11}}{\Delta S_0} \right] \omega_0 + \int_{\text{конв}_2}^T \rho C_p \frac{W_1+W_3}{2} (t_3 - t_i) \omega_0 \frac{\Delta S_{13}}{\Delta S_0} + \\ & + \sum_{j=1}^3 (\int_{\text{MT}}^T + \int_{\text{E}}^T) \rho C_p \frac{W_1+W_j}{2} (t_j - t_i) \omega_0 \frac{\Delta S_{1j}}{\Delta S_0}. \end{aligned} \quad (7)$$

В уравнениях (6, 6-а, 7) $\int_{\text{конв}_1}^T$, $\int_{\text{конв}_2}^T$ - тепловые коэффициенты конвективного межканального обмена в зазорах с пониженной и с повышенной интенсивностью обмена, соответственно, определяемые

с использованием формул (1), (2), (5).

Результаты расчета в целом согласуются с экспериментальными данными. По условиям эксперимента и расчета выполняется условие нормировки по подведенному теплу к теплоносителю для рассмотренных случаев (рис. 7).

2.3. Распределения подогревов теплоносителя по сечению моделей. Эффект "дорожек" теплоносителя.

Распределения подогревов теплоносителя по сечению моделей в направлении градиента энерговыделения неравномерны (рис. 8): максимум в подогревах приходится на зону центральных ячеек в области высокого энерговыделения, минимум - на зону пристенных ячеек в области низкого энерговыделения. Недогревы теплоносителя в пристенных ячейках обусловлены повышенными расходами теплоносителя в этих ячейках.

Основным выводом из сравнения температурных полей исследованных вариантов моделей являются существенно меньшие (в 2 - 2,5 раза) неравномерности в подогревах теплоносителя в сборках с противонаправленными навивками, что обусловлено интенсификацией перемешивания поперечными потоками жидкости по рядам имитаторов твэлов или вокруг отдельных имитаторов.

Рассмотрим более подробно физическую картину процессов, протекающих в сборках с противонаправленными навивками (по рядам имитаторов).

Возникают "горячие" и "холодные" дорожки теплоносителя в коридорах между имитаторами твэлов (рис. 9).

Струи жидкости, идущие по "холодной" дорожке от обечайки из зоны низкого энерговыделения в зону повышенного энерговыделения, не успевают прогреться на расстоянии нескольких рядов имитаторов, но в дальнейшем быстро повышают температуру до уровня температуры в "горячей" дорожке. Падения температуры в пристенных ячейках не происходит, так как поступающая из внутренних ячеек "горячая" жидкость выталкивает "холодную" жидкость из пристенных ячеек.

"Горячие" струи жидкости, идущие по "дорожке" в зону пониженного энерговыделения, теряют избыток тепла с запаздыванием, что обуславливает более плавный характер изменения температуры, чем по "холодной" дорожке.

Возникают неодинаковые разности температуры между "горячей" и "холодной" дорожками в направлении градиента энерговыделения.

Численные значения разностей температуры заметно меньше общих неравномерностей температуры по "дорожкам".

Подогревы теплоносителя, найденные как средние арифметические значения из подогревов по "горячей" и "холодной" дорожкам, распределяются в соответствии с закономерностями, представленными на рис. 9. Максимальная неравномерность температуры наблюдается у сборок с одинаправленными навивками, минимальная - у сборок с противоположенными по рядам имитаторов навивками, промежуточная - у сборок с чередованием гладких и оребренных имитаторов с противоположенными навивками.

В центральной части модельных сборок распределения подогревов теплоносителя и тепловых потоков параллельны друг другу.

Эффект "дорожек" от разнонаправленных навивок нагляден в отношении распределения подогревов вокруг угловых имитаторов твэлов (рис. 10).

В районе имитатора с высоким энерговыделением (№ 19) "горячие" струи жидкости идут из центральных ячеек (93) в периферийные ячейки (109, 132) - распределение температуры в перпендикулярном к градиенту энерговыделения направлении имеет максимум. "Холодные" струи жидкости идут из пристенных ячеек (131, 50) в центральные ячейки (51) - распределение температуры имеет минимум.

В районе имитатора с низким энерговыделением (№ 3) "горячие" струи жидкости идут из центральных ячеек (33) в пристенные ячейки (34, 35) - распределение температуры имеет максимум; а "холодные" струи жидкости - из пристенных ячеек (36, 31) в центральные (32) (распределение температуры имеет минимум).

Чередование "холодных" и "горячих" дорожек в сечении сборки обуславливает волнообразный характер изменения температуры в направлениях, перпендикулярных к градиенту энерговыделения (рис. 11).

На основании вышеприведенных сведений можно заключить, что использование в сборках твэлов быстрых реакторов противоположенных навивок на твэлах эффективно с точки зрения выравнивания подогревов теплоносителя при переменном по сечению сборок твэлов энерговыделении.

2.4. Неравномерности температуры характерных имитаторов твэлов

2.4.1. Влияние типа проволочных навивок на неравномерности температуры имитаторов твэлов при переменном (линейном) энерговыделении по сечению сборки

Из анализа температурных полей характерных имитаторов твэлов (центральный, боковой, угловой - рис. 12 а-в) видно, что

- по периметру центральных имитаторов возникают неравномерности температуры, обусловленные градиентом энерговыделения;
- по периметру пристенных имитаторов местоположения экстремумов температуры отличаются для различных типов оребрения, однако, сохраняется общая тенденция расположения минимума температуры в пристенной зоне сборки и максимума - в центральной зоне (некоторое исключение составляет рис. 12-б);
- средний температурный уровень пристенных имитаторов с противонаправленным оребрением выше, чем с однонаправленным оребрением, из-за выравнивания подогревов теплоносителя противонаправленными навивками.

В случае разнонаправленного оребрения имитаторов происходит стабилизация неравномерностей температуры по длине энерговыделения в отличие от варианта с однонаправленным оребрением (рис. 13).

Максимальные неравномерности температуры по периметру имитаторов описываются следующей формулой в функции числа Пекле:

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{q_i R} \cdot \lambda_f = \alpha Pe^{\beta}, \quad (8)$$

$$200 \leq Pe \leq 800; \quad \ell/d_r \approx 220,$$

где значения коэффициентов α и β берутся из таблицы № 2 для характерных имитаторов твэлов при различных типах проволочных навивок. Используется тепловой поток q_i , соответствующий рассматриваемому твэлу: q_b, q_c, q_u - для бокового, центрального и углового твэла, соответственно.

Формула (8) справедлива для линейного по сечению сборки твэлов энерговыделения (см. соотношение 3) при совпадении градиента энерговыделения с направлением "дорожек" теплоносителя, вызываемых противонаправленными навивками.

Неравномерности температуры для пристенных имитаторов с противонаправленными по ряду имитаторов навивками лежат ниже, чем в случае однонаправленных навивок, в $\sim 3 + 5$ раз для бокового имитатора и в $\sim 1,5 + 2,7$ раза для углового имитатора в интервале чисел Пекле:

$200 \leq Re \leq 600$, включающем значения Re для номинальных режимов работы реакторов (что весьма важно с практической точки зрения) - рис.14. При чередовании гладких и оребренных имитаторов с противоположенными навивками снижение неравномерностей температуры происходит примерно в такой же мере для бокового имитатора твэла, имеющего проволочную навивку. Снижения не наблюдается для углового имитатора, не имеющего проволочной навивки.

Для центральных имитаторов твэлов неравномерности температуры при различных вариантах оребрения практически одинаковы в области больших чисел Пекле, включающих Re для номинальных режимов работы реакторов. С уменьшением Re происходит расслоение данных, и неравномерности температуры для встречного оребрения даже несколько превышают неравномерности для однонаправленного оребрения. Этот факт не имеет принципиального значения, так как неравномерности температуры центральных имитаторов невелики по сравнению с неравномерностями пристенных имитаторов.

2.4.2. Влияние характера энерговыделения по сечению сборок на неравномерности температуры твэлов при фиксированном типе оребрения твэлов

Численные значения безразмерных неравномерностей температуры при переменном по сечению сборки энерговыделении больше, чем при постоянном энерговыделении, что видно из сравнения данных для боковых имитаторов в случае однонаправленных навивок (рис. 15). Расчет неравномерностей температуры для постоянного по сечению сборки энерговыделения проведен по формуле из работы [7]:

$$\frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{q \cdot R} \cdot \lambda_f = 0,21 + 2,75 \exp(-0,0088 Re) \quad (9)$$

$$100 \leq Re \leq 700; \quad \ell/d_f \approx 220$$

2.5. Температурные поля обечаек

Температурные поля обечаек формируются под влиянием поперечных потоков теплоносителя вдоль периметра обечаек (сборка с однонаправленными навивками), "горячих" и "холодных" дорожек теплоносителя (сборка с разнонаправленными навивками), переменного характера энерговыделения и других факторов, вызывающих неравномерное распределе-

ние температуры по периметру обечаек (рис. 16).

Несмотря на наличие локальных неравномерностей температуры на гранях обечайки общая неравномерность температуры характеризуется максимумом на гранях в зоне высокого энерговыделения и минимумом - на гранях в зоне низкого энерговыделения. Численное значение неравномерности температуры составляет примерно 40 % от среднего значения температуры по периметру обечайки и может быть рассчитано по формуле (8) при заимствовании коэффициентов α и β из таблицы № 2. При этом в формулу (8) подставляется тепловой поток центрального имитатора твэла ($q_{ц}$), равный среднему тепловому потоку по сечению сборки.

ВЫВОДЫ

1. В сборках твэлов реакторов с противонаправленными проволочными навивками на твэлах происходит интенсификация межканального перемешивания, что приводит к значительному выравниванию подогреваемого теплоносителя по сечению сборок и уменьшению неравномерностей температуры пристенных твэлов по сравнению с вариантом дистанционирования твэлов однонаправленными навивками. Это может иметь большое практическое приложение для снижения неравномерностей температуры при градиентном энерговыделении по сечению сборок и образованию горячих пятен при блокировках проходных сечений сборок, неоднородностях по топливу, деформации решетки вследствие допусков, распухания твэлов при выгорании, смещения и прогибов твэлов и других причин.
2. Получены эмпирические формулы для расчета неравномерностей температуры характерных твэлов кассет быстрых реакторов (боковой, угловой, центральный твэл) для нескольких вариантов винтового оребрения твэлов (однонаправленное оребрение, противонаправленные навивки по рядам твэлов, чередование гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками) при переменном (линейном) энерговыделении по сечению сборок, характерном для кассет твэлов быстрых реакторов в районе экранов.
3. Переменное по сечению сборок твэлов энерговыделение вызывает увеличение безразмерных неравномерностей температуры твэлов по сравнению с постоянным энерговыделением вследствие возникновения дополнительных неравномерностей в подогревах теплоносителя вокруг рассматриваемого твэла из-за градиента энерговыделения.
4. Неравномерности температуры центральных твэлов при переменном

энерговыделении примерно одинаковы для однонаправленного и противонаправленного оребрения твэлов при относительно больших числах Пекле, включающих Pe для номинальных режимов работы быстрых реакторов. Численные значения неравномерностей температуры центральных твэлов в несколько раз меньше, чем пристенных твэлов.

5. Разработанная программа по оценкам температурных полей в сборках твэлов с противонаправленными навивками позволяет проводить теплофизический расчет кассет твэлов быстрых реакторов при заимствовании экспериментальных данных по коэффициентам перемешивания и неравномерностям температуры твэлов для различных вариантов дистанционирования твэлов противонаправленными навивками.

Список литературы

1. Казачковский О.Д., Мешков А.Г., Митенков Ф.М. и др. "Программа и состояние работ по быстрым реакторам в СССР" - "Атомная энергия", т. 43, вып. 5, 1977, с. 343-351.
2. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Рыжкович К.С. и др. Сравнение коэффициентов межканального перемешивания при различных способах винтового оребрения стержней. - Препринт ФЭИ - 1158, Обнинск, 1981.
3. Жуков А.В., Свириденко Е.Я., Матюхин Н.М. и др. Влияние некоторых способов дистанционирования стержней (винтовое оребрение) на межканальное перемешивание. - Препринт ФЭИ - 978, Обнинск, 1980.
4. Жуков А.В., Сорокин А.П., Ушаков П.А. и др. Поканальный теплогидравлический расчет сборок твэлов ядерных реакторов. Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 5, 307 - 311.
5. Жуков А.В., Котовский Н.А., Кудрявцева Л.К. и др. Межканальное взаимодействие в решетках твэлов быстрых реакторов. Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов. Материалы симпозиума СЭВ, т. 1, с. 114 - 127, изд. ЧСР АЭ, Прага, 1978.
6. Жуков А.В., Корниенко Д.Н., Сорокин А.П. и др. Методы и программы поканального теплогидравлического расчета сборок твэлов с учетом межканального взаимодействия теплоносителя. - Аналитический обзор ФЭИ ОБ-107, Обнинск, 1980.

7. Субботин В.И., Ушаков П.А., Жуков А.В. и др. Температурные поля твэлов с жидкометаллическим охлаждением. - "Атомная энергия"; 1967, т. 22, вып. 5, с. 372.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- t - температура;
 Δt - подогрев теплоносителя;
 q_f - удельный тепловой поток с поверхности теплообмена;
 λ_f - коэффициент теплопроводности теплоносителя;
 $\int_{\text{конв}}^G$ - гидродинамический конвективный (за счет ребер на твэлах) коэффициент межканального обмена массой (коэффициент перемешивания);
 $\int_{\text{конв}}^T$ - коэффициент межканального обмена теплом за счет конвекции ребрами (тепловой коэффициент межканального обмена);
 G - весовой расход теплоносителя;
 S - расстояние между центрами твэлов (имитаторов);
 $d = 2R$ - внешний диаметр твэла (имитатора);
 d_r - гидравлический диаметр центральных ячеек;
 l - текущая длина от начала энерговыделения;
 h - шаг проволочной навивки на твэлах (имитаторах);
 φ - угол отсчета по периметру твэла (имитатора);
 e - поперечная перетечка теплоносителя;

Безразмерные параметры

- $Re = \frac{\bar{W} d_r}{\nu}$ - число Рейнольдса, рассчитанное по средней по сечению скорости теплоносителя (\bar{W}) и гидравлическому диаметру центральных ячеек;
 $Pe = \frac{\bar{W} d_r}{\alpha}$ - число Пекле, рассчитанное по средней по сечению скорости теплоносителя и гидравлическому диаметру центральных ячеек;

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\alpha R} \lambda_f$$

безразмерная максимальная неравномерность температуры по периметру твэла (имитатора);

h/d — относительный шаг проволочной навивки на твэлах (имитаторах);

$x = \frac{s}{d}$ — относительный шаг твэлов (имитаторов) в сборке.

И н д е к с ы :

max — максимальный,

min — минимальный,

— — средний (по сечению сборки, по ряду ячеек),

W — относящийся к стенке,

f — относящийся к жидкости,

об — относящийся к обечайке,

Г — гидродинамический,

T — тепловой,

конв — конвективный,

ВХ — на входе в сборку,

i = 1, 2, 3 ... или относящийся к центральному (i ~ ц), боковому (i ~ Б), угловому (i ~ у) твэлам.

Таблица № I

Геометрические характеристики теплогидравлических
моделей кассет твэлов

№ п/п.	Наименование		Величина
1.	Внешний диаметр имитаторов твэлов, $d = 2R$ мм		16
2.	Внутренний диаметр имитаторов твэлов, $d_i = 2R_i$ мм		13
3.	Относительный шаг треугольной решетки, S/d		1.185
4.	Длина энерговыделения, l_0 мм		1700, 1720
5.	Расстояние от торца имитатора до начала энерговыделения, l_H мм		55
6.	Расстояние между торцевыми решетками пучка, L мм		1790
7.	Тип оробрения	Однонаправленные проволочные навивки	проволока $\phi 3$ мм в центральной зоне, $\phi 1.5$ мм - в периферийной зоне
Чередование гладких и оребренных имитаторов твэлов с противонаправленными навивками на соседних имитаторах			
Разнонаправленные по рядам имитаторов проволочные навивки			
8.	Шаг навивки проволоки, h мм		192
9.	Зазор между обечайкой и имитаторами твэлов, $\Delta = \frac{S-d}{2}$ мм		1.5
10.	Расстояние между гранями шестигранной обечайки, k мм		118
11.	Число имитаторов твэлов, n		37
12	Проходное сечение модели Ω см ²	Модель с однонаправленными проволочными навивками	44.0
		Модель с чередующимися гладкими и оребренными имитаторами с противонаправленными навивками на соседних имитаторах	44.6

12		<p>Модель с разнонаправленными по рядам имитаторов проволочными навивками</p>	44.0
13.	<p>Проходное сечение ячеек</p>	<p>Модель с однонаправленными проволочными навивками: центральная ячейка, $\omega_{ц}, \text{мм}^2$ боковая - " - , $\omega_{б}, \text{мм}^2$ угловая - " - , $\omega_{у}, \text{мм}^2$</p>	<p>53 79.I 18.3</p>
		<p>Модель с чередующимися гладкими и оребренными имитаторами твэлов с противонаправленными навивками на соседних имитаторах: центральная ячейка, $\omega_{ц}, \text{мм}^2$ боковая - " - , $\omega_{б}, \text{мм}^2$ угловая - " - , $\omega_{у}, \text{мм}^2$</p>	<p>53.8 61.I 9.8</p>
		<p>Модель с разнонаправленными по рядам имитаторов твэлов проволочными навивками: центральная ячейка, $\omega_{ц}, \text{мм}^2$ боковая - " - , $\omega_{б}, \text{мм}^2$ угловая - " - , $\omega_{у}, \text{мм}^2$</p>	<p>53 79.I 18.3</p>
14.	<p>Гидравлический диаметр центральной ячейки $d_{г}, \text{мм}$</p>	<p>Модель с однонаправленными навивками</p>	7.II
		<p>Модель с чередующимися гладкими и оребренными имитаторами твэлов с противонаправленными навивками на соседних имитаторах</p>	7.II
		<p>Модель с разнонаправленными по рядам имитаторов твэлов проволочными навивками</p>	7.II

Таблица № 2

Значения коэффициентов α и β в формуле (8)

Тип проволочных навивок на твэлах	α	β
Боковой твэл (зона максимального энерговыделения)		
Однонаправленные на твэлах навивки	105.4	- 0.85
Противонаправленные по рядам твэлов навивки	135	- 1.1
Чередование гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками	133	- 1.05
Угловой твэл (зона минимального энерговыделения)		
Однонаправленные на твэлах навивки	185.7	- 0.92
Противонаправленные по рядам твэлов навивки	773	- 1.3
Чередование гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками	1000	- 1.19
Центральный твэл (зона среднего по сечению сборки энерговыделения)		
Однонаправленные на твэлах навивки	7.35	- 0.59
Противонаправленные по рядам твэлов навивки	34	- 0.82
Чередование гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками	35.5	- 0.78
Обечайка кассеты		
Однонаправленные на твэлах навивки	250	- 1.03
Противонаправленные по рядам твэлов навивки	212	- 0.94
Чередование гладких и оребренных твэлов с противонаправленными навивками	309	- 1.01

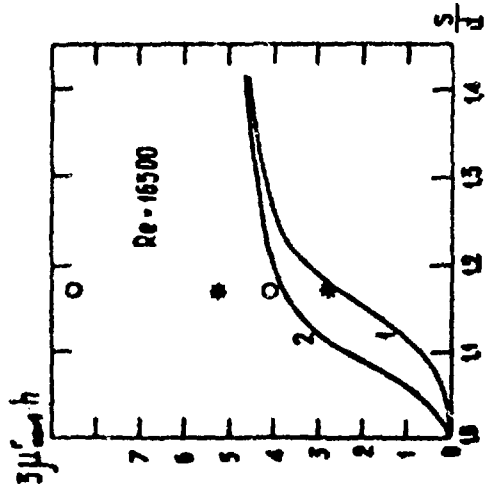


Рис. 1. Коэффициенты механического перемешивания в сборках оребренных твэлов: 1-сборки с однонаправленными навивками на твэлах типа "ребро по ребру" (формула 1); 2-сборки с однонаправленными навивками на твэлах типа "ребро по оболочке" (формула 2); * - сборки с разнонаправленными навивками на твэлах при чередовании гладких и оребренных твэлов (два зазора с низкой интенсивностью обмена, один зазор с высокой интенсивностью обмена); O - сборки с разнонаправленными по рядам твэлов навивками (два зазора с высокой интенсивностью обмена, один зазор с низкой интенсивностью обмена)

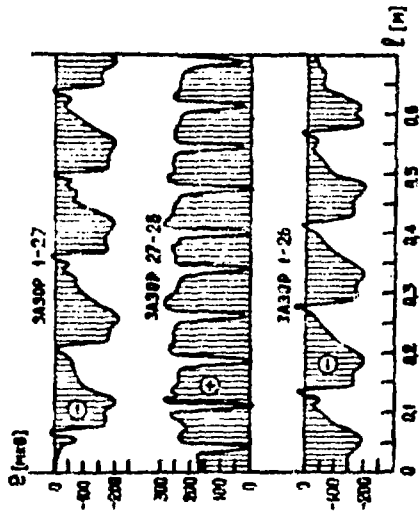
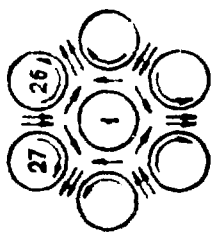


Рис. 2. Распределение поперечных потоков теплоносителя (в мкВ датчика) по длине зазоров ячейки имитатора в твэлов, дистанционируемых разнонаправленными навивками при чередовании гладких и оребренных имитаторов. 1, 26, 27-номера имитаторов (см.рис. 3). Двойными стрелками (здесь и далее) обозначен усиленный в два раза поперечный поток теплоносителя

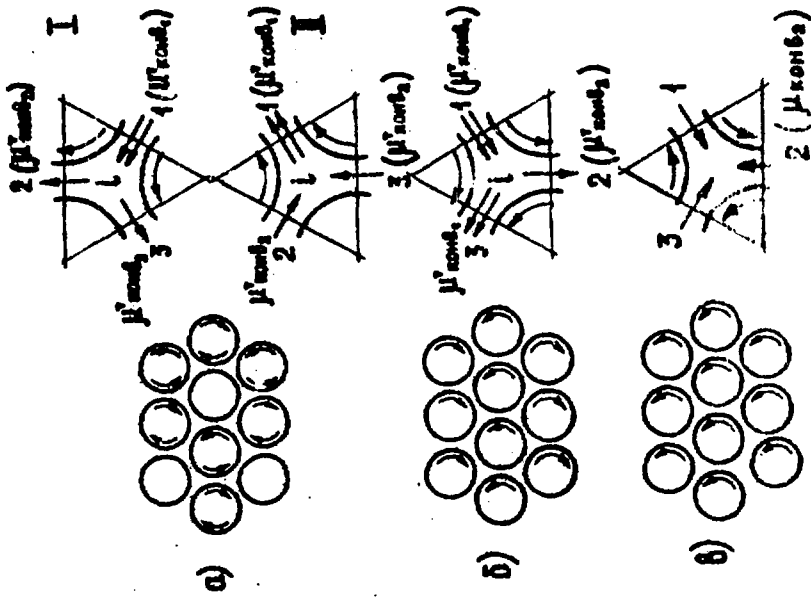


Рис. 4. Схема расположения элементов твэлов и направления поляризации в твэлах теплоносителя в зорах 1, 2, 3 при четном и нечетном направлении твэлов при четырехканальном твэловом и оребренных твэлах; б) -противонаправленные по рядам твэлов навивки; в) -одна направленные на твэлах навивки

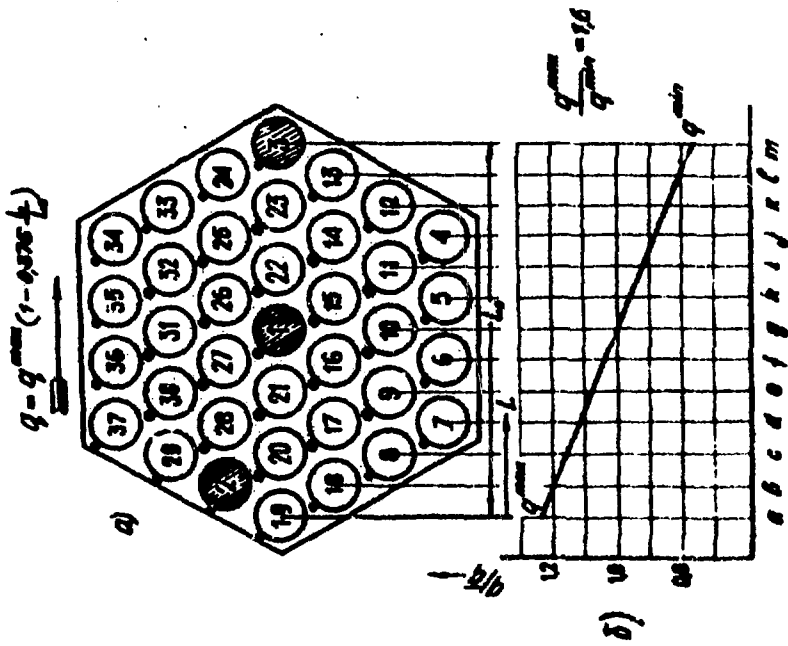


Рис. 2. Поперечное сечение модельной сборки твэлов (а) и распределение энерговыделения по сечению сборки (б). 1, 2, 3 - поворотные имитаторы твэлов с термоларями; 4+37 - неподвижные имитаторы твэлов; а+м - абсциссы центров имитаторов

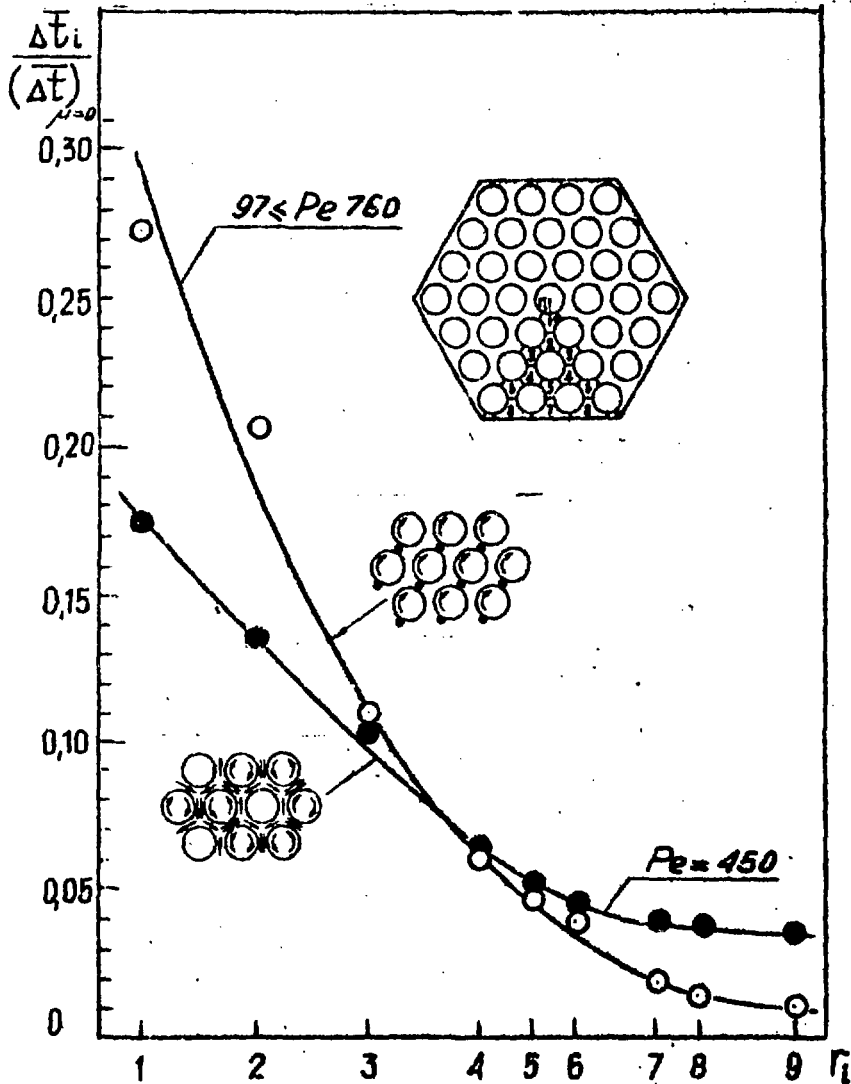


Рис. 5. Изменение подогревов теплоносителя по радиусу модельных сборок твэлов при одиночном обогреве центрального имитатора твэла. ΔT_i - усредненный по ячейкам на радиусе r_i подогревов теплоносителя; $(\Delta T_i)_{r=0}$ - подогрев теплоносителя в ячейках, окружающих центральный имитатор, при отсутствии межканального теплообмена.

○, — результаты экспериментов и расчетов, соответственно, для однонаправленных навивок;
 ●, — результаты экспериментов и расчетов, соответственно, для разнонаправленных навивок при чередовании гладких и оребренных имитаторов

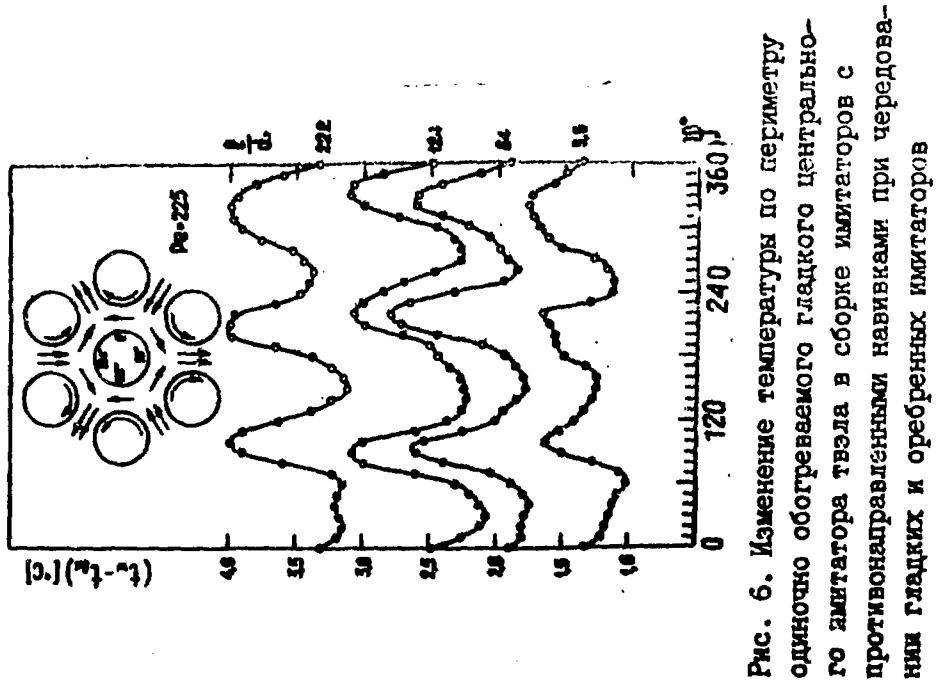


Рис. 6. Изменение температуры по периметру одиночно обогреваемого гладкого центрального имитатора твэла в сборке имитаторов с противонаправленными навивками при чередовании гладких и оребренных имитаторов

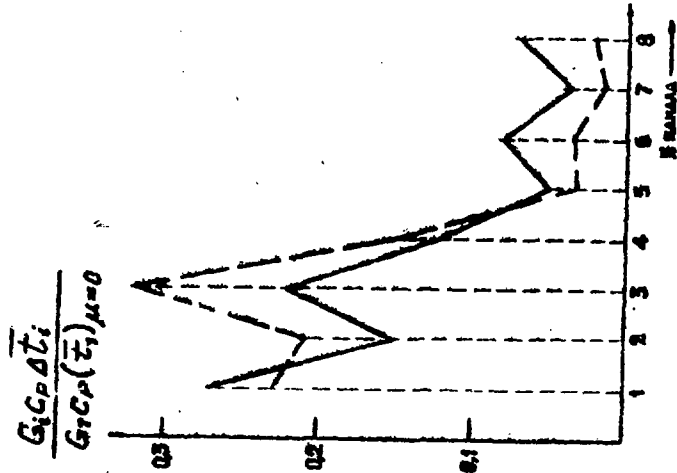


Рис. 7. Изменение по сечению сборки усредненных по каналам относительных теплопроводностей для случаев однонаправленных навивок (—) и разнонаправленных навивок при чередовании гладких и оребренных имитаторов твэлов (---). М каналов см. на рис. 5

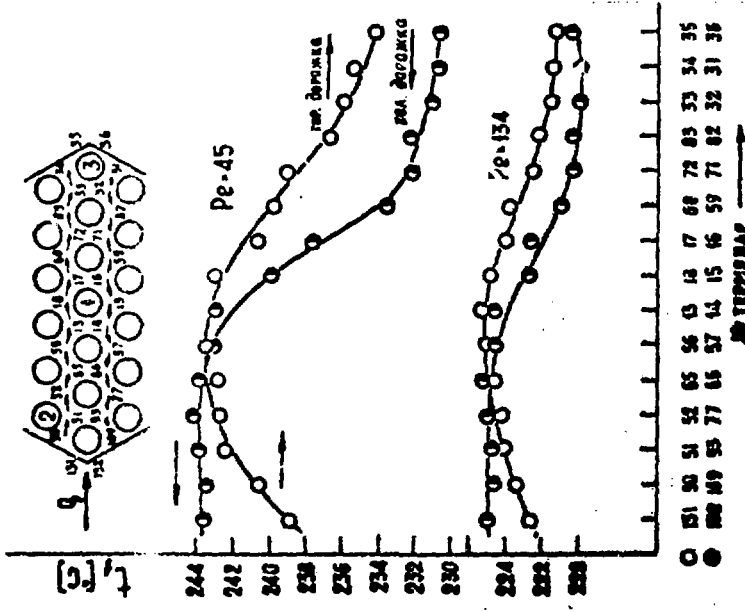


Рис. 9. Изменение температуры теплоносителя по рядам ячеек в направлении градиента энергии деления (модель с противонаправленными по рядам имитаторов твэлов навивками). \circ - "Холодная дорожка" теплоносителя, \square направление уменьшения энерговыделения

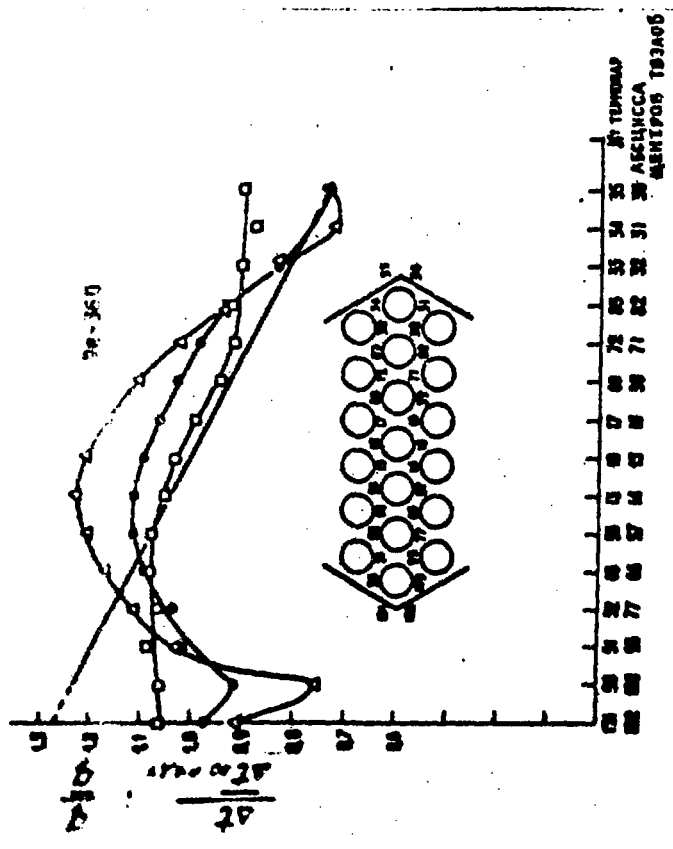


Рис. 8. Изменение относительных подогревов теплоносителя и энерговыделения (прямая линия) по рядам ячеек модельной сборки: Δ - однонаправленные навивки; \circ - противонаправленные навивки при чередовании гладких и оребренных имитаторов твэлов; \square - противонаправленные по рядам имитаторов твэлов; Δt - среднее арифметическое значение из подогревов теплоносителя в двух соседних ячейках смежных рядов ячеек; $\Delta t_{\text{ср}}$ - среднее по ряду ячеек значение подогрева теплоносителя)

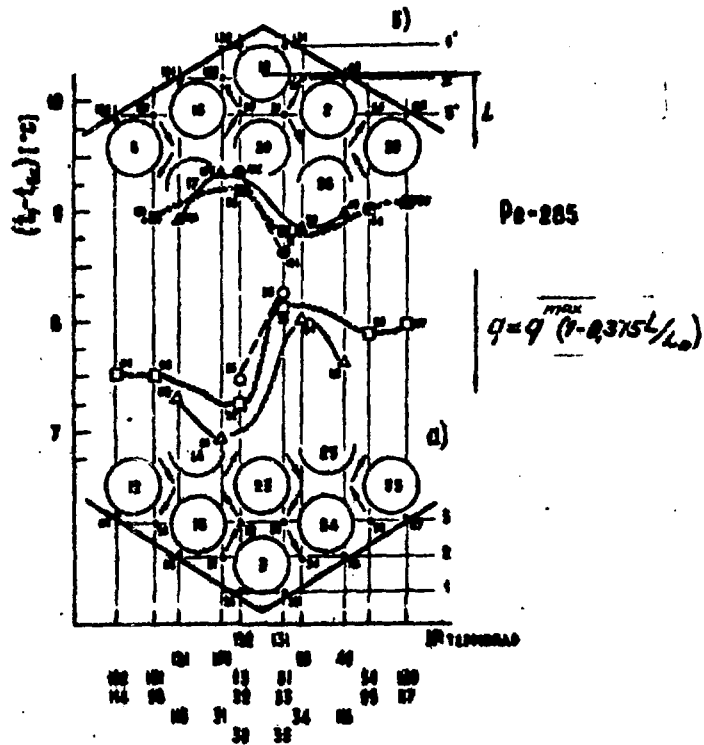


Рис. 10. Изменение температуры теплоносителя в направлениях, перпендикулярных градиенту энерговыделения, в районе угловых зон модели с противоположенными по рядам кинитаторов навивками а) - зона низкого энерговыделения, б) - зона высокого энерговыделения. 3 + 33 - номера кинитаторов твэлов; Δ , \square , \circ , \bullet , \blacksquare , \blacktriangle - экспериментально измеренные температуры. —, —, —, — кривые, проведенные через экспериментальные точки

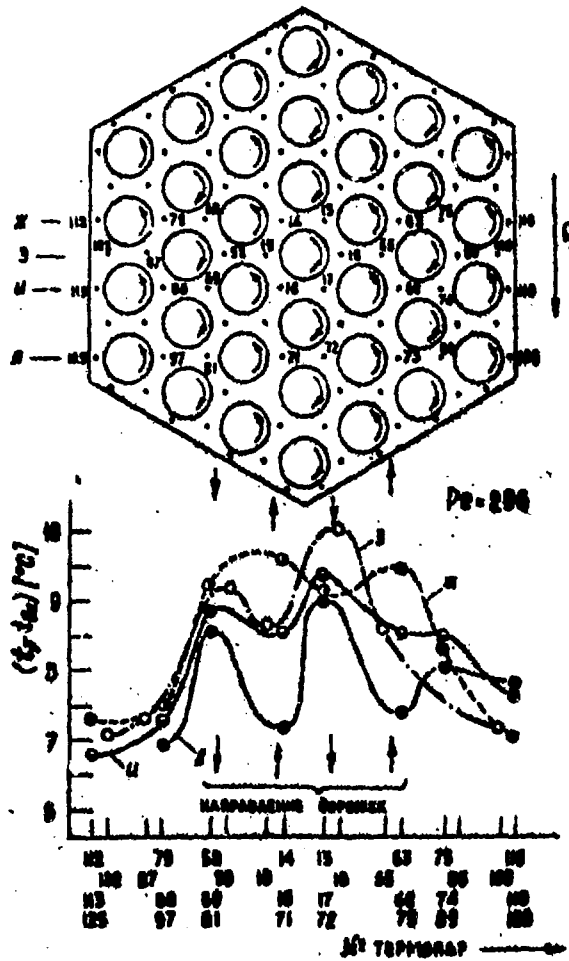


Рис. II. Изменение температуры теплоносителя в направлениях Ж, З, И, Л, перпендикулярных градиенту энерговыделения, в сечении модели с противонаправленными по рядам имитаторов навивками. ●, ■, ○, □ - экспериментально измеренные температуры; —, — — —, — — — — — кривые, проведенные через экспериментальные точки

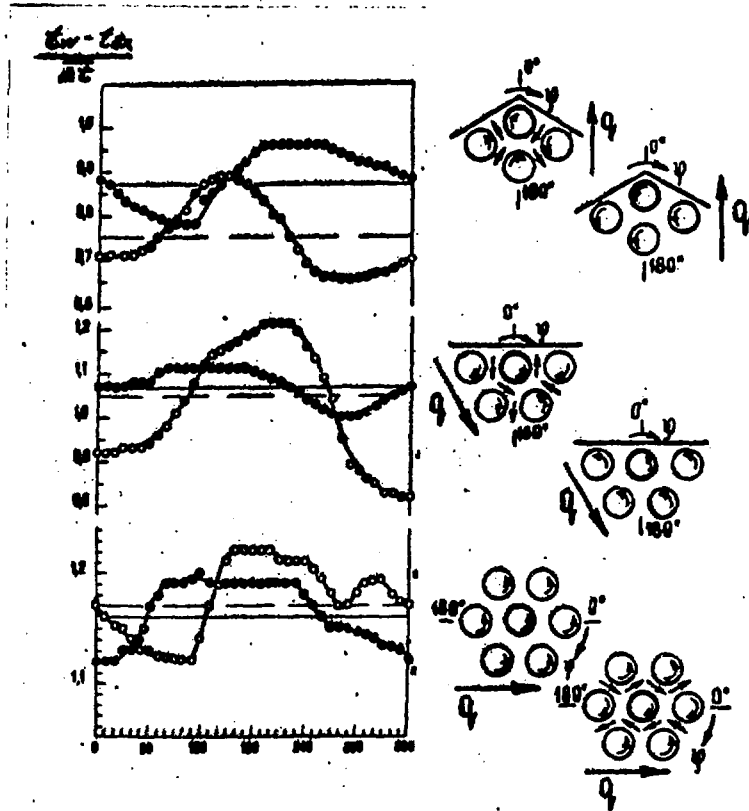


Рис. 12-а. Изменение относительной температуры стенки по периметру углового, бокового и центрального имитаторов твэлов в случае одинаправленных (○) и разнонаправленных по рядам имитаторов навивок (⊙); Δt - средний по сечению модели подогревов теплоносителя

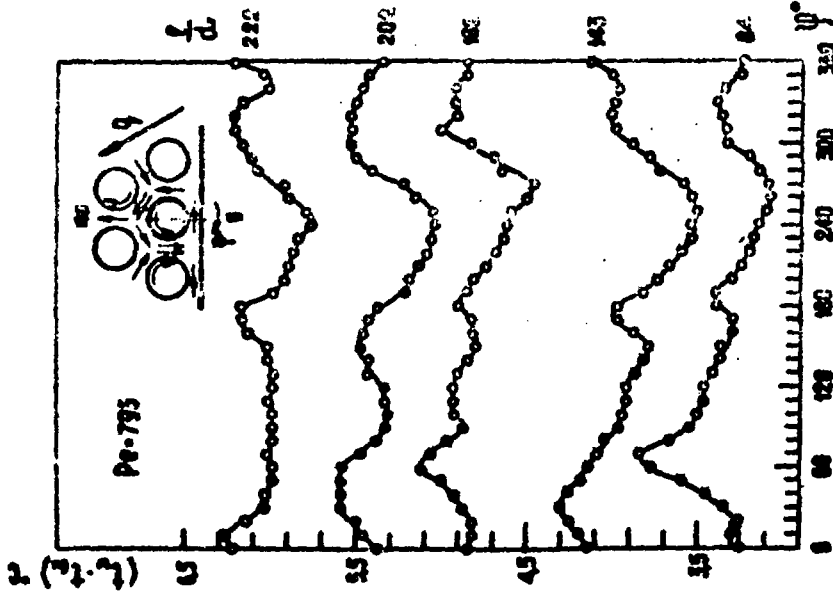


Рис. 12-6

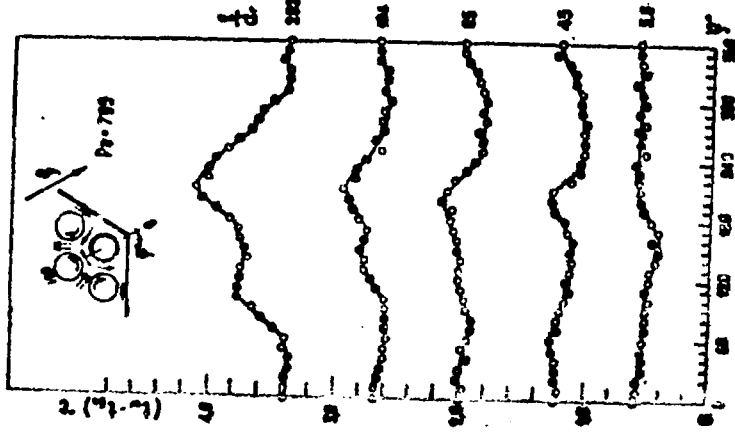


Рис. 12-8

Изменение температуры стенки по периметру бокового (б) и углового (в) имитаторов твэлов модели с протяжнонаправленными навихами при чередовании гладких и оребренных имитаторов твэлов (боковой имитатор оребрен, угловой - без оребрения)

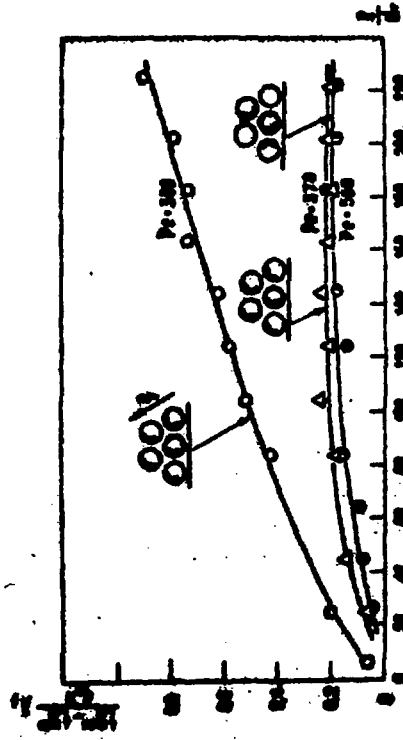


Рис. 13. Изменение максимальных неравномерностей температуры боковых имитаторов твэлов по длине энерго- деления моделей с однонаправленными навивками (—○—), разнонаправленными по рядам имитаторов навивками (—△—) и с чередующимися гладкими и оребренными имитаторами с противонаправленными навивками (—□—)

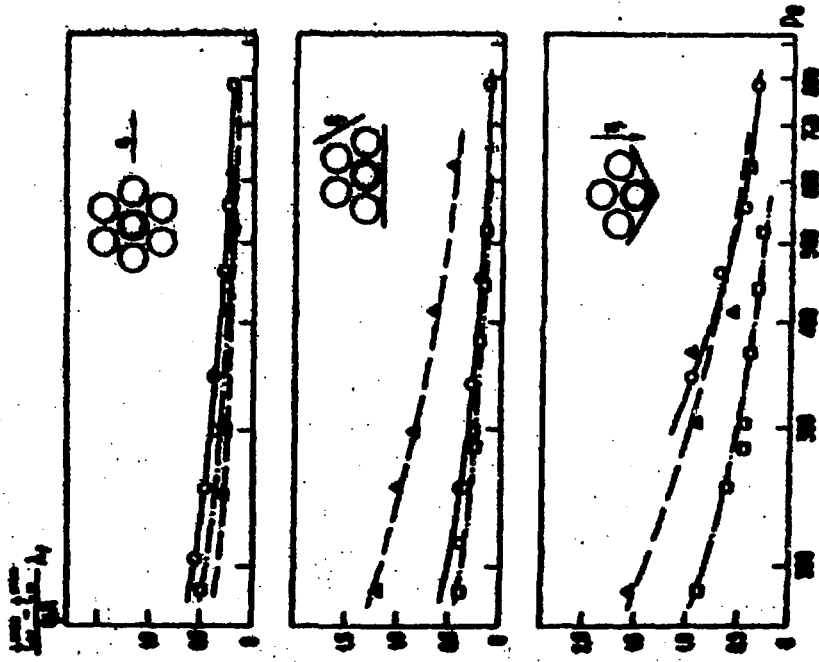


Рис. 14. Зависимость от шела Давле безразмерных неравномерностей температуры центрального, бокового и углового имитаторов твэлов сборка с однонаправленными навивками (△ - экспериментальные точки, --- расчет по формуле 8), с разнонаправленными по рядам твэлов навивками (□ - экспериментальные точки, --- расчет по формуле 8), с разнонаправленными навивками при чередовании гладких и оребренных твэлов (○ - экспериментальные точки, --- расчет по формуле 8)

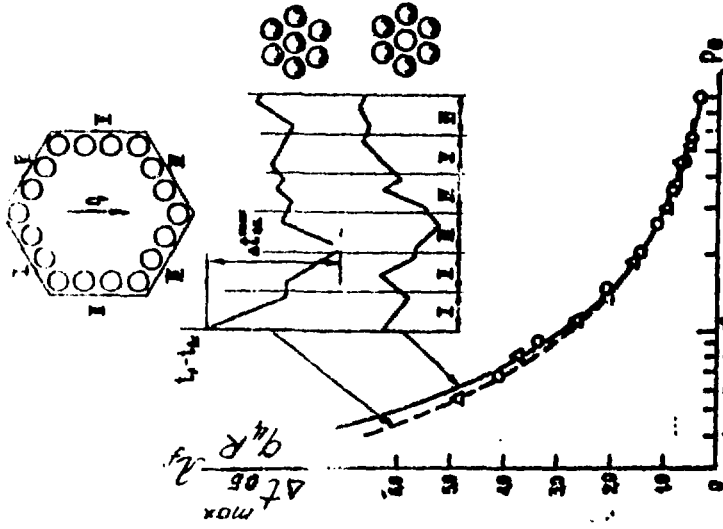


Рис. 16. Зависимость неравномерностей температуры обечайки от числа Пекле. Разнонаправленные по рядам катушаторов твэлов наивышки: Δ - экспериментальные точки, - - - расчет по формуле (8); Чередованием главных и оребренных катушаторов с противонаправленными наивышками: \circ - экспериментальные точки, — расчет по формуле (8)

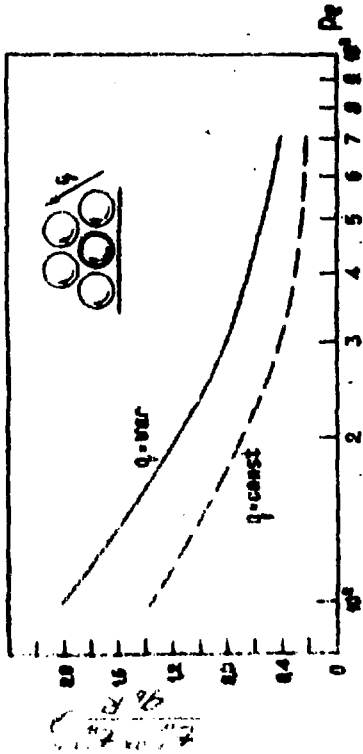


Рис. 15. Зависимость безразмерных неравномерностей температуры бокового катушатора твэла от числа Пекле для переменного (— формула 8) и постоянного (--- формула 9) по сечению сборки энергоузелений при одностороннем оребрении катушаторов твэлов

Технический редактор **Н. П. Герасимова.**

Подписано к печати 15.04-1983 г. Т-08930. Формат 60×90 1/16.
Офсетная печать. Усл. п. л. 1,9. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 98 экз.
Цена 19 коп. ФЭИ-1396. Индекс 3624.

Отпечатано на ротапринтере ФЭИ, г. Обнинск.

19 коп.

Индекс 3624

Интенсификация теплообмена в сборках твэлов быстрых реакторов с противонаправленными проволочными навивками при неравномерном по сечению сборок энерговыделении.

ФЭИ-1396, 1983, 1-30.