



ФЭИ
РОСАТОМ

Теплогидравлические исследования температурных режимов ТВС активной зоны реакторов на быстрых нейтронах (к 50-летию пуска АЭС с реактором БН-350)

**Заседание НТС АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
посвященное 50-летию пуска реактора БН-350 /
14 июля 2023 г., АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск**

**Сорокин Александр Павлович
Главный научный сотрудник, д.т.н.**

Задачи теплогидравлических исследований тепловыделяющих сборок быстрых реакторов



Теплогидравлический анализ активной зоны быстрых реакторов является одной из важнейших компонент комплекса задач по обоснованию параметров БР, относящихся к физике реакторов, термомеханике, теории прочности

Создан комплекс теплогидравлических жидкометаллических стендов, разработаны основы моделирования теплогидравлических процессов, методики экспериментов, конструкции моделей, созданы датчики, расчётные коды

Проведены комплексные – экспериментальные и расчётные исследования физики и характеристик процессов гидродинамики и теплообмена в сборках твэлов активной зоны с жидкометаллическими теплоносителями, проведен их анализ

- ✓ профилей скорости и температуры по нормали к стенкам твэлов
- ✓ распределения касательных напряжений по периметру твэлов и гидравлического сопротивление сборок твэлов
- ✓ распределения скорости и температуры теплоносителя по сечению ТВС
- ✓ распределения температуры по периметру твэлов и теплоотдачи твэлов в ТВС
- ✓ длин начальных гидродинамических и тепловых участков
- ✓ межканального обмена массой, импульсом и энергией в сборках твэлов жидкометаллических теплоносителей

Исследования проводились под руководством Субботина В.И., Кириллова П.Л., Козлова Ф.А., Ибрагимова М.Х., Ушакова П.А.

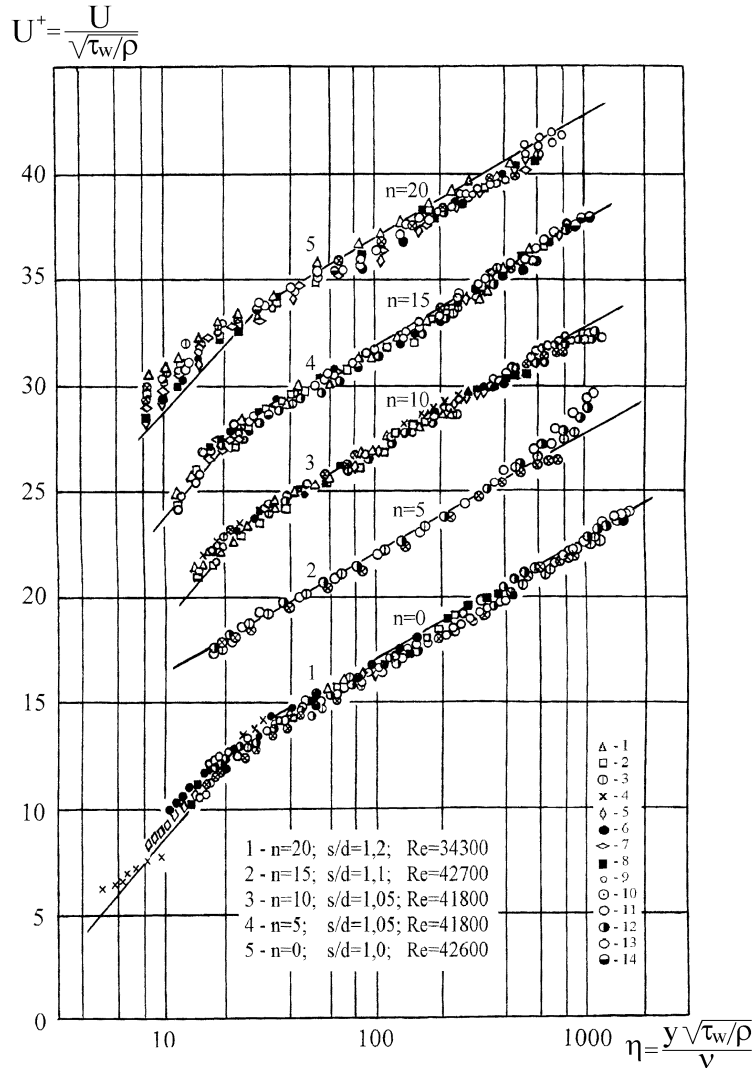
Значительный вклад в проведение исследований внесли ученые-теплофизики Волчков Л.Г., Воробьева Т.А., Габрианович Б.Н., Грабежная В.А., Грачев Н.С., Жуков А.В., Ефанов А.Д., Загоруйко Ю.И., Кузнецов Э.К., Юрьев Ю.С. и многие другие.

Экспериментальные исследования теплообмена и температурных полей в ТВС активной зоны быстрых реакторов

Особенности теплообмена и формирования температурных полей в активной зоне быстрых реакторов

- ✓ для твэлов решается «сопряжённая задача» теплообмена
- ✓ гидравлический диаметр не является универсальным характерным размером
- ✓ отсутствует тепловая стабилизация по длине активной зоны, методики расчёта установившегося по длине теплообмена в ТВС – неприемлемы
- ✓ температурные режимы твэлов в основном определяются не коэффициентами теплоотдачи, а распределением локальных расходов теплоносителя в ТВС
- ✓ имеются большие неравномерности температуры в поперечном сечении ТВС и по азимуту твэлов
- ✓ значительное воздействие на температурный режим ТВС может оказывать деформация ТВС активной зоны в процессе кампании
- ✓ интенсивный межканальный обмен (вследствие проволочной навивки на твэлах) значительно выравнивает локальные неравномерности температуры в ТВС – «горячие пятна», в определенной степени выравнивает общую неравномерность температуры по сечению отдельных ТВС и активной зоны в целом

Безразмерные профили скорости в решётках твэлов

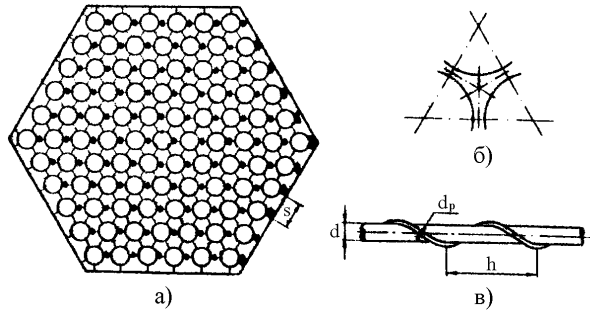


Профили скорости на нормалях к стенкам сложных каналов при течении жидких металлов описываются универсальным законом Прандтля-Кармана

$$U^+ = \begin{cases} \eta & \text{при } \eta < 5 \\ 5 \ln \eta - 3,05 & \text{при } 5 \leq \eta \leq 30 \\ 2,5 \ln \eta + 5,5 & \text{при } \eta \geq 30 \end{cases}$$

Гидравлическое сопротивление каналов

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{8} \text{Re} \int_0^1 \left(\frac{R \, dR}{1 + \frac{\varepsilon \sigma}{\nu}} \right) R \, dR$$

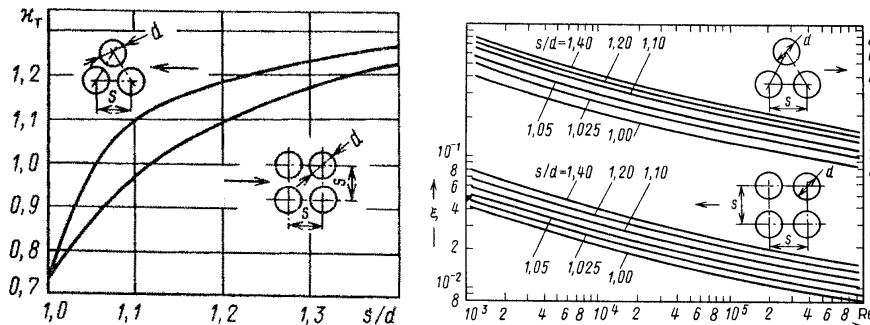


Треугольная решётка гладких твэлов

$$\xi / \xi_{\text{тр}} = 0,57 + 0,18 (s/d - 1) + 0,53 [1 - \exp(-a)]$$

Квадратная решётка гладких твэлов

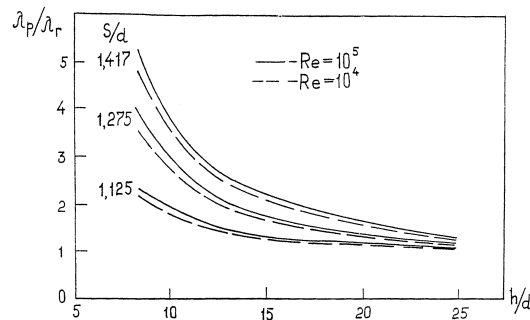
$$\xi / \xi_{\text{тр}} = 0,59 + 0,19 (s/d - 1) + 0,52 [1 - \exp(-b)]$$



$$\xi = \frac{0,210}{\text{Re}^{0,25}} \left[1 + (s/d - 1)^{0,32} \right]$$

$$b = 10 (s/d - 1) \quad 1 \leq s/d \leq 2$$

$$10^4 \leq \text{Re} \leq 2 \cdot 10^5$$



Треугольная решётка оребрённых твэлов

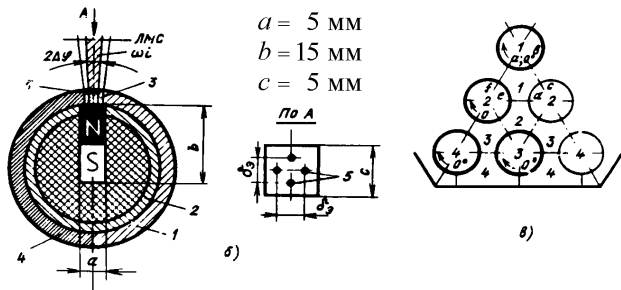
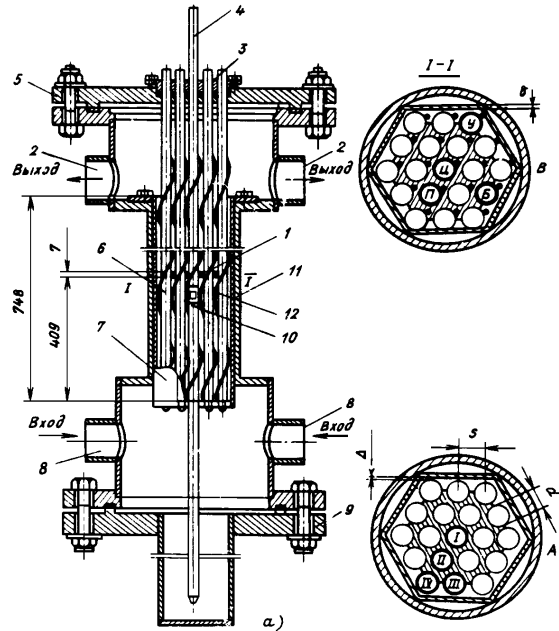
$$\xi_P = \frac{0,210}{\text{Re}^{0,25}} \left\{ 1 + \frac{124}{(h/d)^{1,65}} [1,78 + 1,485 (s/d - 1)] (s/d - 1) \right\}$$

$$1,0 \leq s/d \leq 1,5$$

$$10^4 \leq \text{Re} \leq 2 \cdot 10^5$$

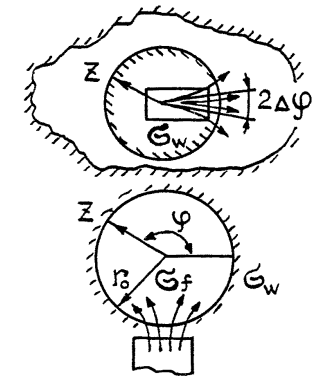
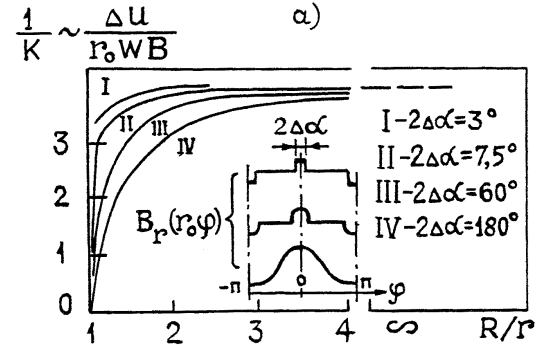
$$8 \leq h/d \leq 50$$

Развит и теоретически обоснован электромагнитный метод измерения локальных расходов жидкого металла в пучках ТВЭЛов



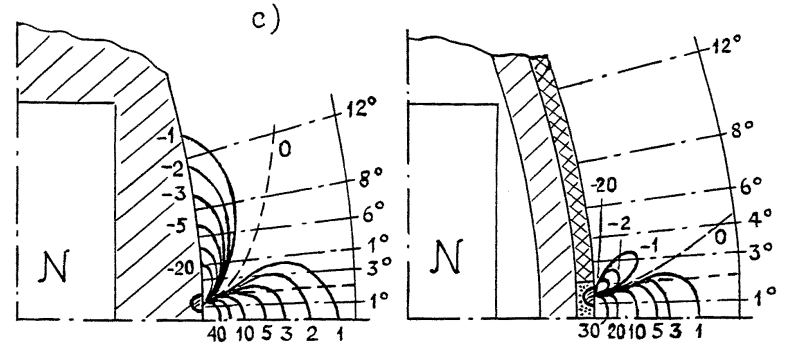
$$\Delta U(r_0) = \sum_{m=1,3,5}^{\infty} U_m = \frac{1}{2} W \Psi \sum_{m=1,3,5}^{\infty} f_m \left(\frac{R}{r_0}, \delta \right) \Phi_m (2\Delta\varphi);$$

$$\delta = \frac{1 - \epsilon_w / \epsilon_f}{1 + \epsilon_w / \epsilon_f}; \quad \Psi = 1 + \delta; \quad f_m = \frac{1 + (r_0/R)^{2m}}{1 - (r_0/R)^{2m} \delta}$$



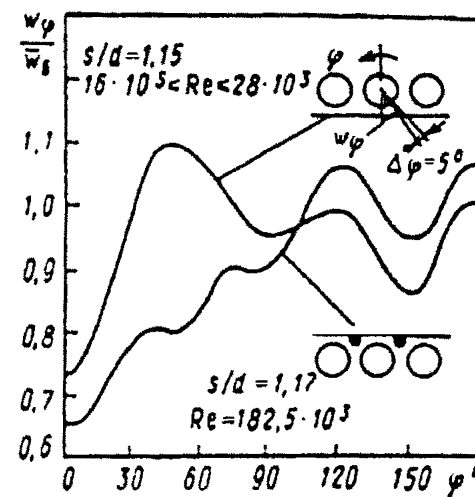
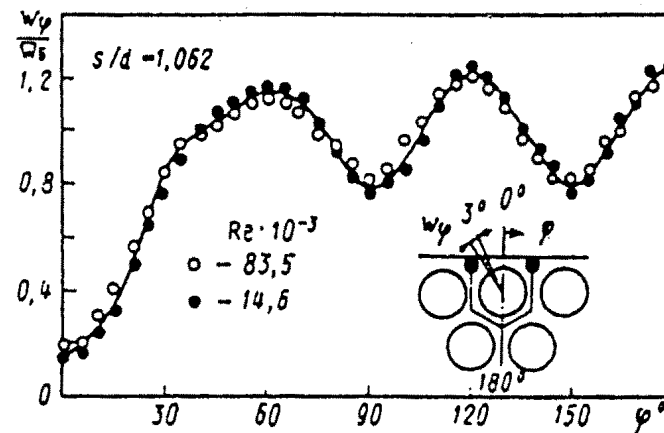
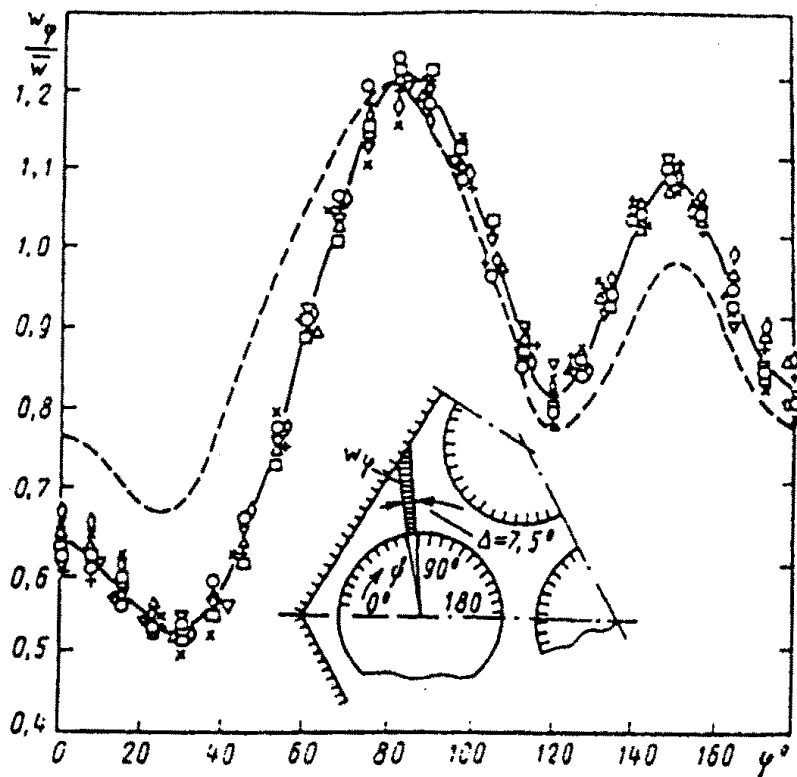
$$\Delta U(2\Delta\varphi) = \iint W(z) G(\Delta\varphi, z) dX dY$$

$$z = X + iY$$



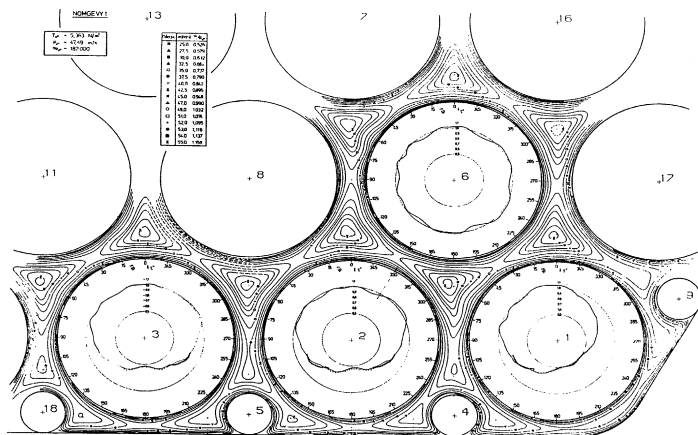
Экспериментальная модель для изучения распределения скорости по сечению ТВС

Распределение скорости по периметру твэлов в периферийной области модельной

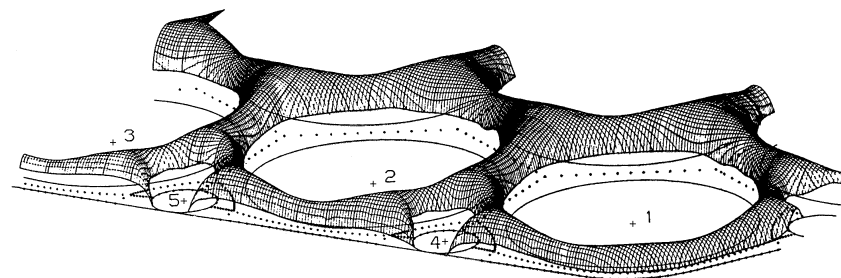
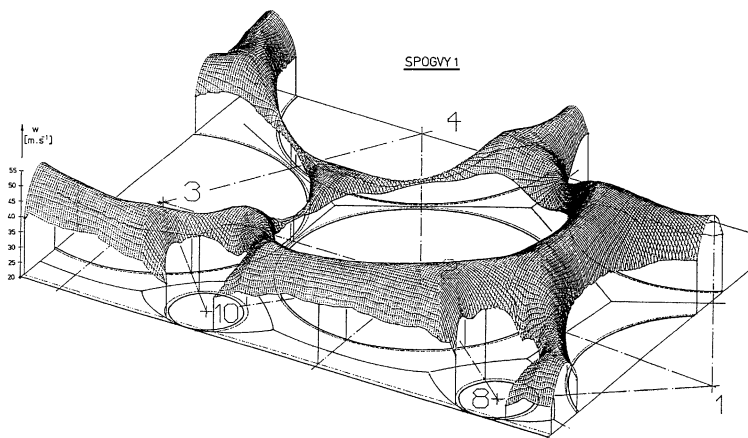
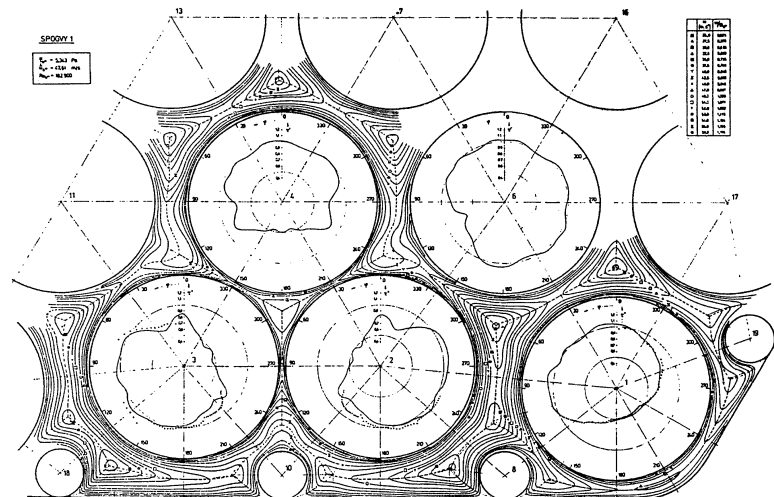


Поле скорости и распределение касательных напряжений на поверхности твэлов в периферийной области модельной ТВС

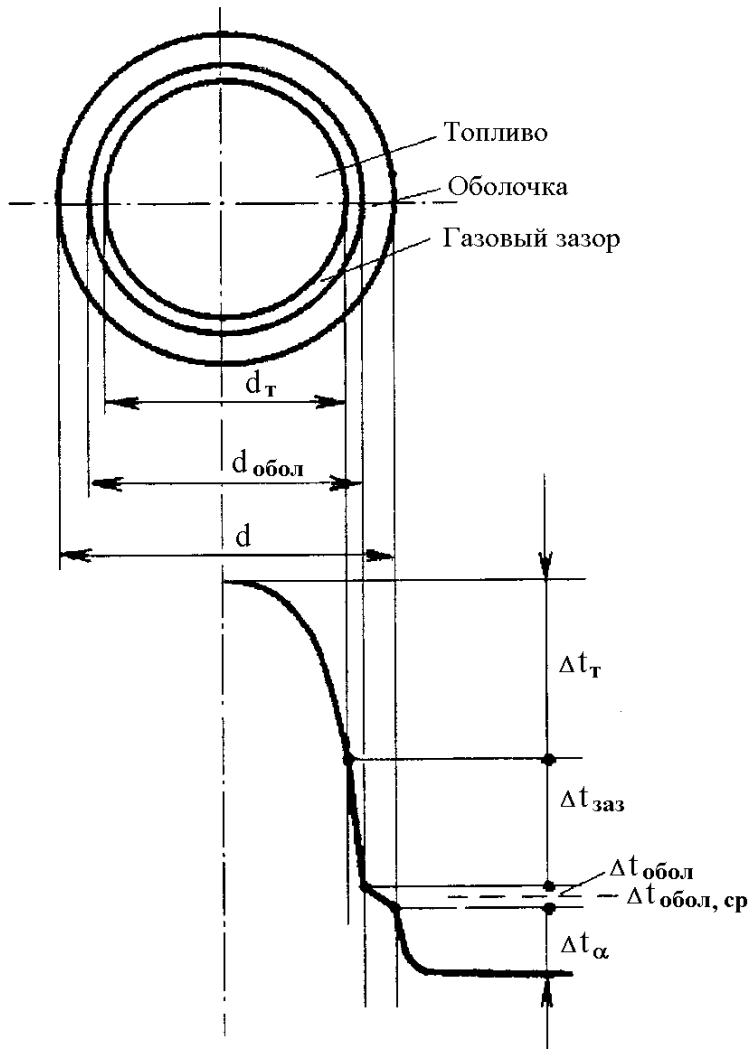
Номинальная геометрия



Деформированная решётка



Расчет температурного режима твэлов в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах



$$t_w^{\max} = t_{ex} + \Delta t + \Delta t_{\alpha} + \Delta t_{\varphi}^{\max} \frac{z}{z+1}$$

$$t_{\text{обол}}^{\max} = t_w^{\max} + \Delta t_{\text{обол}} + \Delta t_{\text{случ откл}}$$

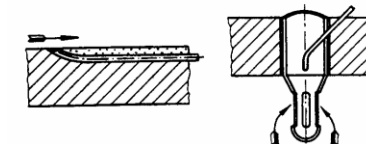
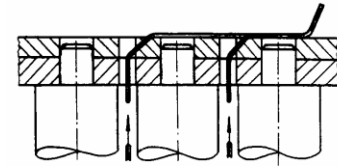
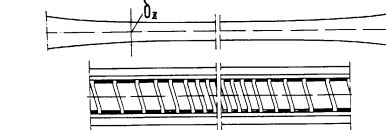
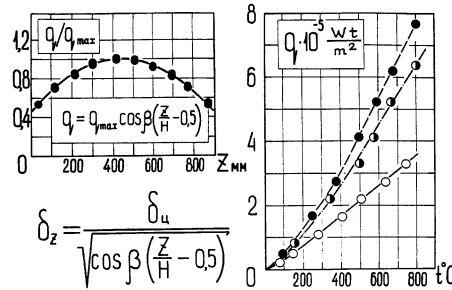
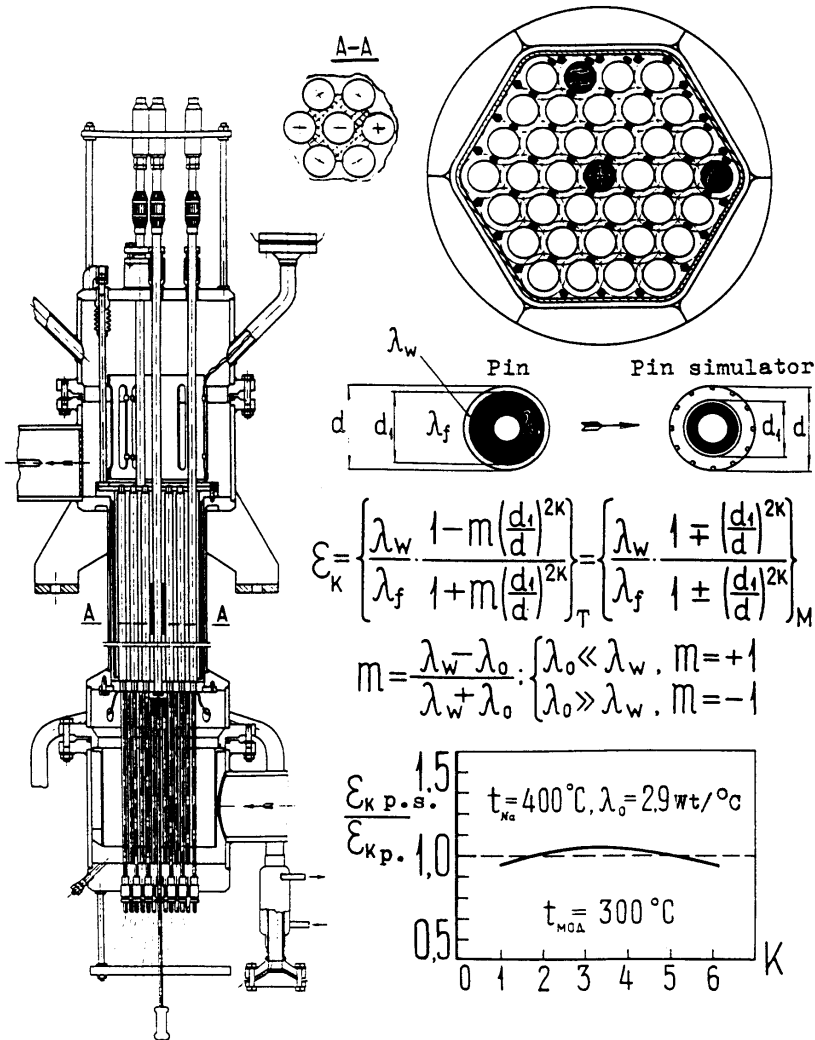
$$t_T^{\max} = t_{\text{обол}}^{\max} + \Delta t_{\text{заз}} + \Delta t_T$$

$$\text{Nu} = \bar{\alpha} d_r / \lambda_f \quad d_r = \frac{4\omega}{\Pi}$$

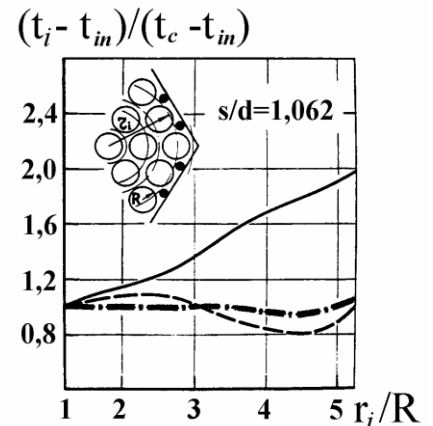
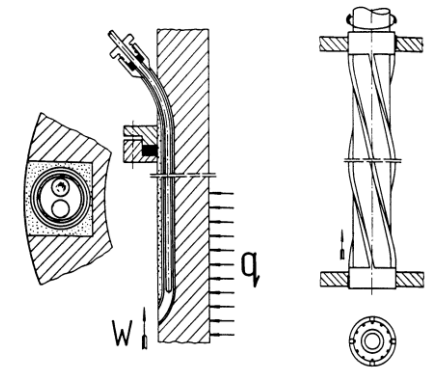
$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, s/d, \varepsilon_k)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\lambda_{\text{обол}}}{\lambda_T} \frac{1 - mR}{1 + mR} \quad m = \frac{\lambda_{\text{обол}} - \lambda_T}{\lambda_{\text{обол}} + \lambda_T} \quad R = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{12}$$

Экспериментальная модель, имитаторы твэлов, методика измерений температуры поверхности имитаторов твэлов и в потоке теплоносителя

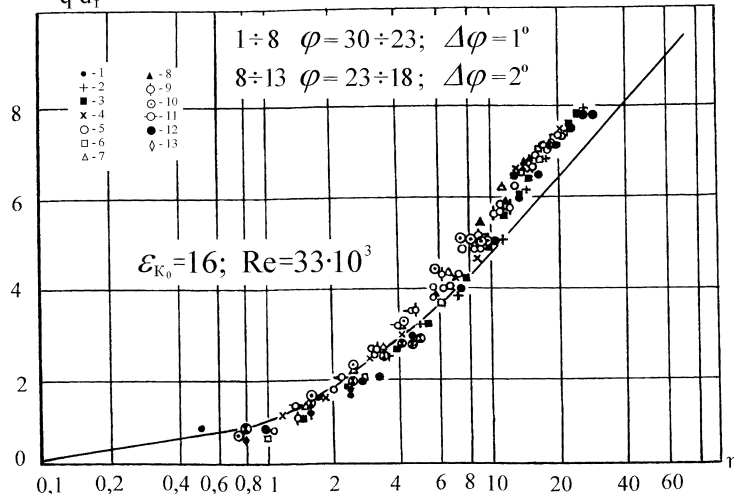


Thermo electrode diameter, mm	0,05	0,10	0,15	0,20
Depth of groove, mm	0,06	0,12	0,18	0,25
Width of groove, mm	0,12	0,25	0,35	0,55



Теплоотдача в решётках твэлов

$$T^+ = \frac{(t_w - t)}{q \cdot d_f} \lambda_f \sqrt{t_w / \rho}$$



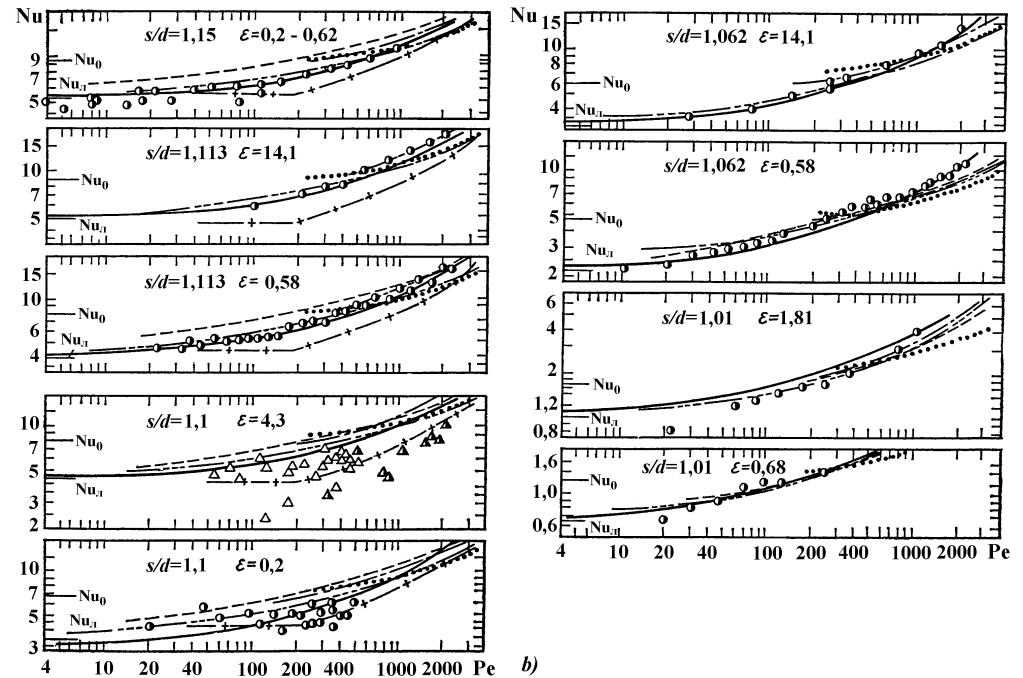
$$T^+ = 4,75 \ln \eta - 7,5$$

**Подтверждена квазиуниверсальность
безразмерного профиля температуры
по нормали к поверхности каналов
при теплосъёме жидкими металлами**

Интеграл Лайона

$$\frac{1}{Nu} = 2 \int_0^1 \frac{\int_0^R W R dR}{\left(1 + \frac{Pr}{Pr_T} \frac{\varepsilon_\sigma}{\nu}\right) R} dR$$

$$Nu = Nu_{\text{лам}} + f Pe^\varphi$$



Теплоотдача в треугольных решётках ТВЭЛОВ

$$Nu = Nu_{\text{лам}} + f Pe^\varphi$$

$$s/d = 1,0$$

$$Nu = 1,25 \left(1 - \frac{3,6}{4,2 + 2,5 \varepsilon^{0,86}} \right) + 0,041 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1,24 \varepsilon + 1,15}} \right) Pe^{0,65}$$

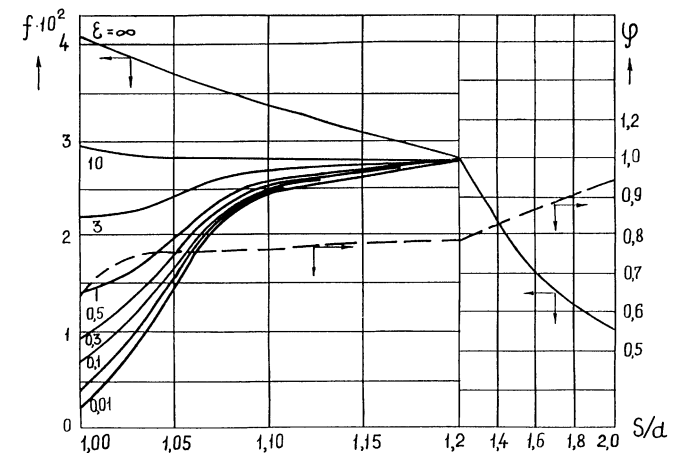
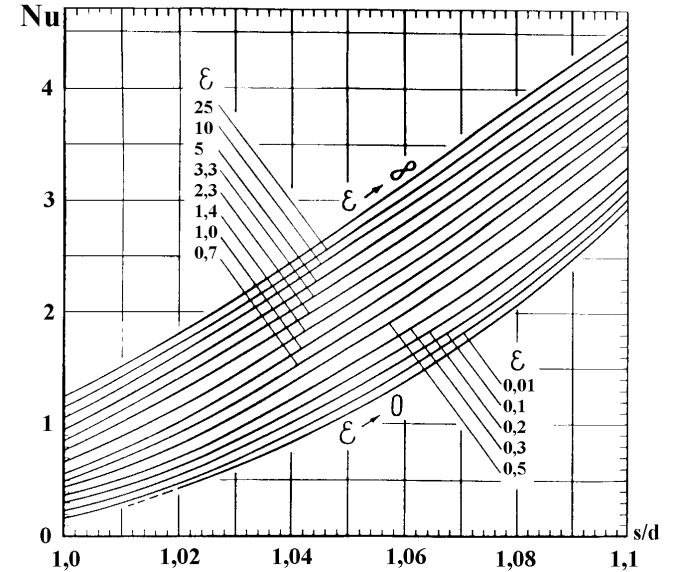
$$1,01 \leq s/d \leq 1,15$$

$$Nu = 7,55 x - \frac{6,3}{x^{17 x(x-0,81)}} \left[1 - \frac{3,6 x}{x^{20} (1 + 2,5 \varepsilon^{0,86}) + 3,2} \right] +$$

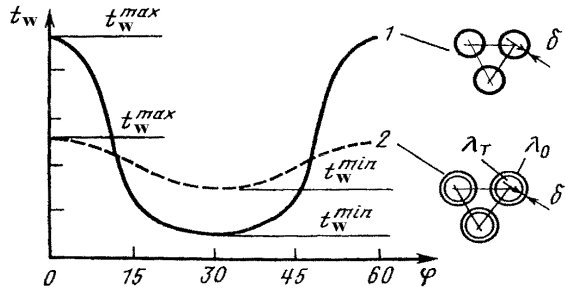
$$+ \frac{0,041}{x^2} \left[1 - \frac{1}{\frac{x^{30} - 1}{6} + \sqrt{1,24 \varepsilon + 1,15}} \right] Pe^{0,56 + 0,19 x - \frac{0,1}{x^{80}}}$$

$$1,2 \leq s/d \leq 1,95$$

$$Nu = 7,55 - 20 x^{-13} + \frac{0,041}{x^2} Pe^{0,56 + 0,19 x}$$

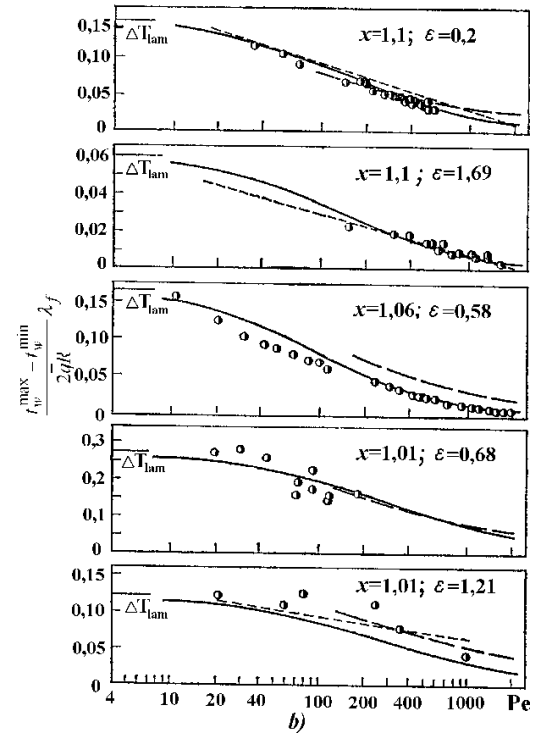
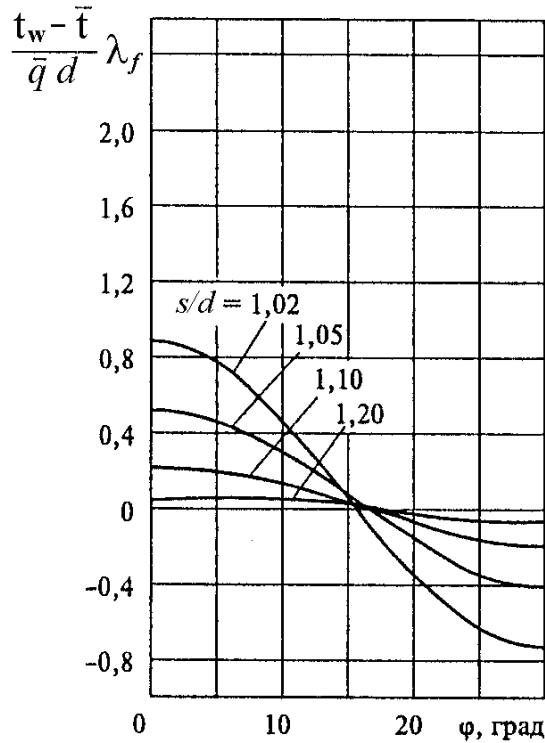
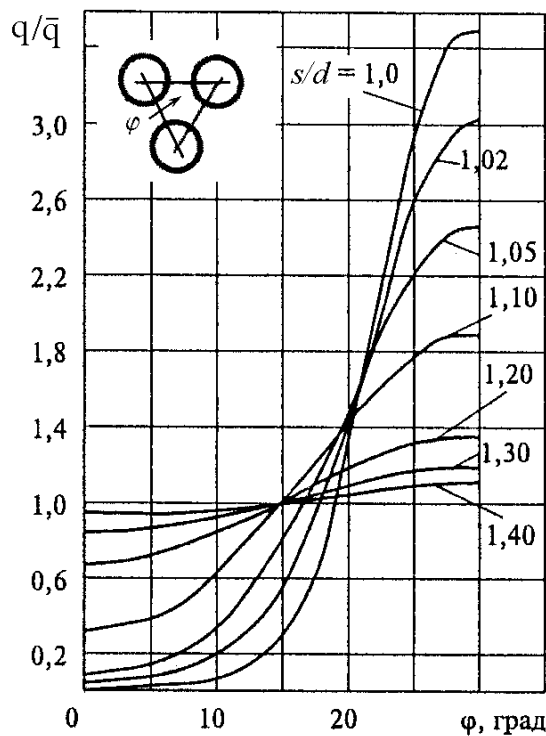


Азимутальная неравномерность температуры ТВЭЛОВ в решётках ТВЭЛОВ



$$\Delta t_{\varphi}^{\max} = t_w^{\max} - t_w^{\min}$$

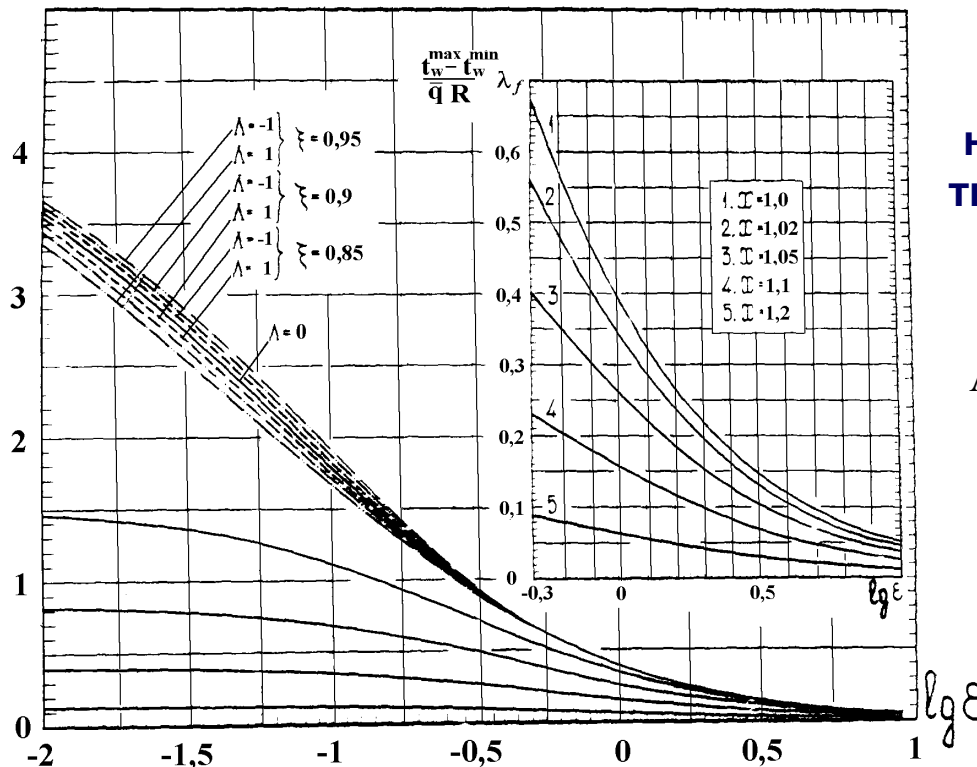
$$\Delta T_{\varphi}^{\max} = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{q R} \lambda_f = f(\text{Re}, \text{Pr}, s/d, \varepsilon_k)$$



Максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов в решётках твэлов

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{q R} \lambda_f = \frac{\Delta T_{\text{лам}}}{1 + \gamma \text{Pe}^\beta} \quad \beta = 0,65 + \frac{51 \lg(s/d)}{(s/d)^{20}} \quad \gamma = 0,008 (1 + 0,03 \varepsilon_6)$$

$$\frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{q R} \lambda_f$$



Номограмма для определения максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов для ламинарного режима течения

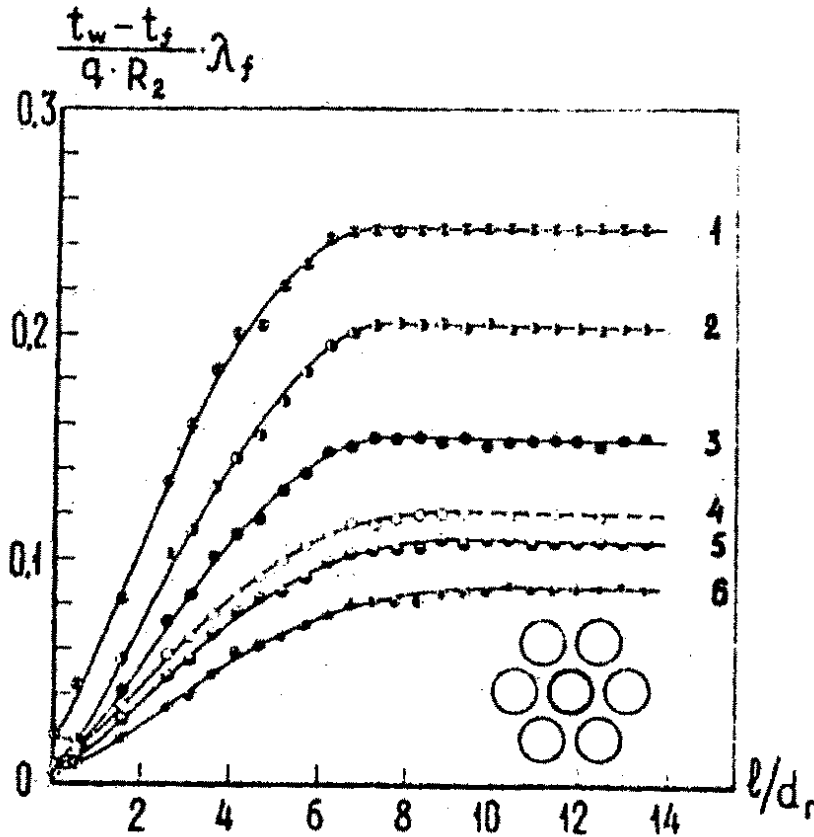
$$\Lambda = (\lambda_w - \lambda_0) / (\lambda_w + \lambda_0)$$

$$\xi_1 = R_1 / R \quad \varepsilon = \varepsilon_6$$

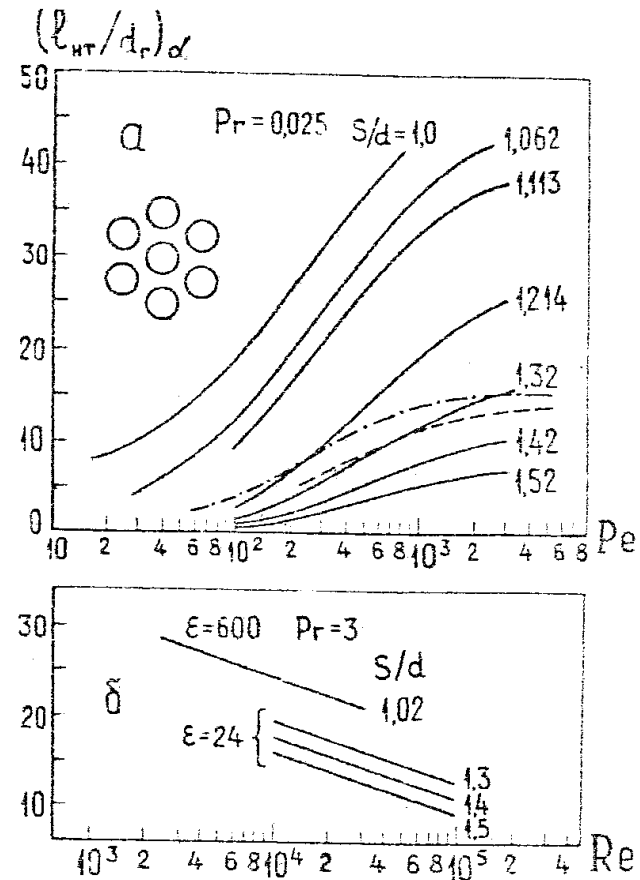
$$1 \leq s/d \leq 15 \quad \varepsilon_6 > 0,2$$

$$1 \leq \text{Pe} \leq 2000$$

Начальный участок по теплоотдаче в решётках ТВЭЛОВ

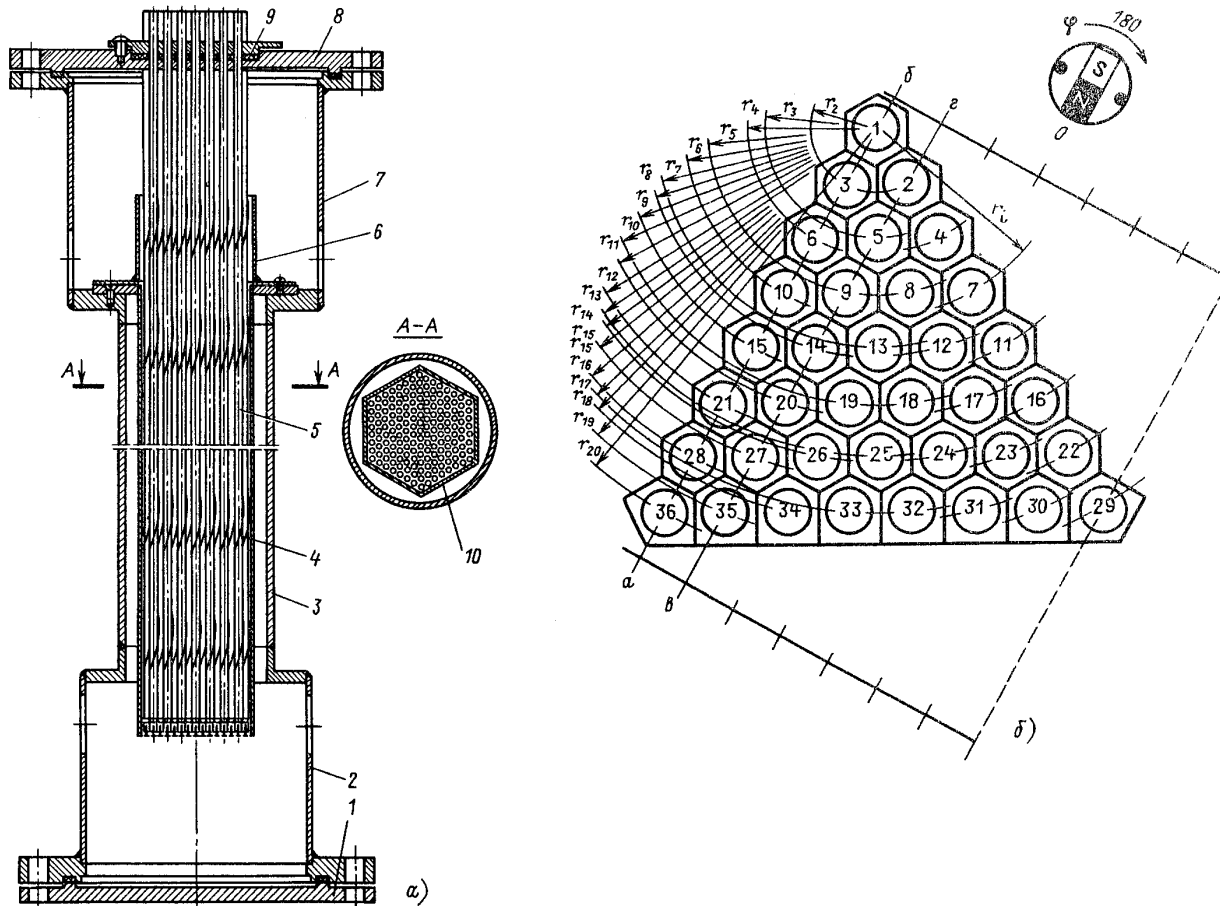


Распределение температурного напора стенка – жидкость, $s/d=1,42$; Re : 1 – 140; 2 – 440; 3 – 720; 4 – 1160; 5 – 2300; 6 – 2800



Длины начальных тепловых участков для теплоотдачи при отсутствии гидродинамической стабилизации

Экспериментальная модель для исследования распределения скорости по сечению ТВС реактора БН-350

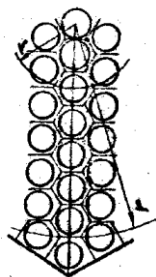
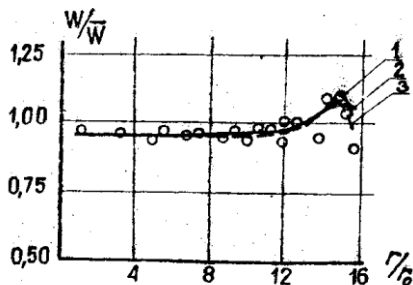


а – «натурная ТВС реактора БН-350; б – схема размещения датчиков в трубках;

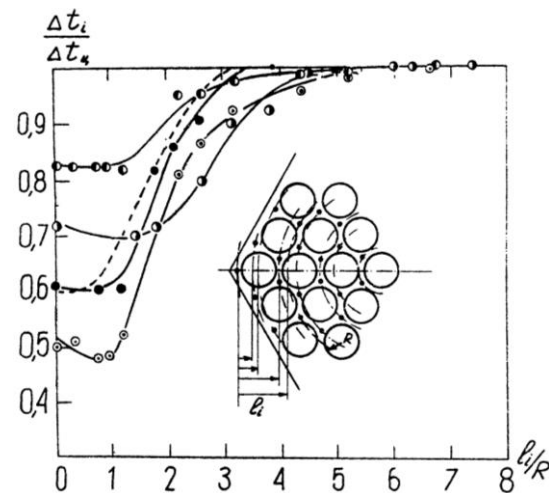
а: 1 – нижний фланец; 2 – нижний коллектор; 3 – корпус; 4 – ребра; 5 – трубки;
6 – стакан; 7 – верхний коллектор; 8 – верхний фланец; 9 – уплотнение; 10 – чехол;

б: 1 – 36 – обозначения трубок; r_2 – r_{20} – радиусы, на которых размещены центры трубок

Распределения скорости и подогрева теплоносителя по радиусу ТВС БН-350 с различными геометрическими параметрами



Распределение скорости жидкости по радиусу модели БН-350 с оребренными элементами без вытеснителей ($s/d=1,15$; $\Delta/(s-d)=0,5$; натрий; $20 \geq Pe \geq 460$)

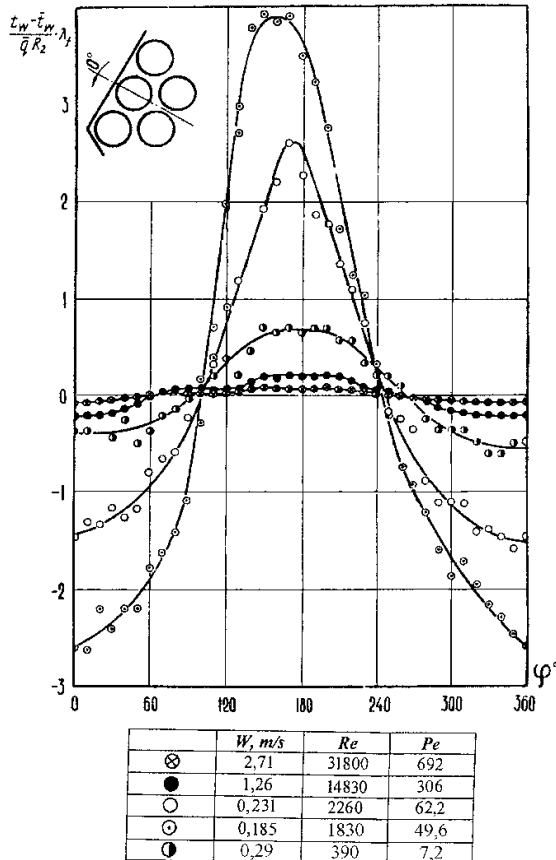


Изменение температуры жидкости по радиусу моделей (Δt_i , Δt_c – подогревы теплоносителя в i -м и центральном каналах)

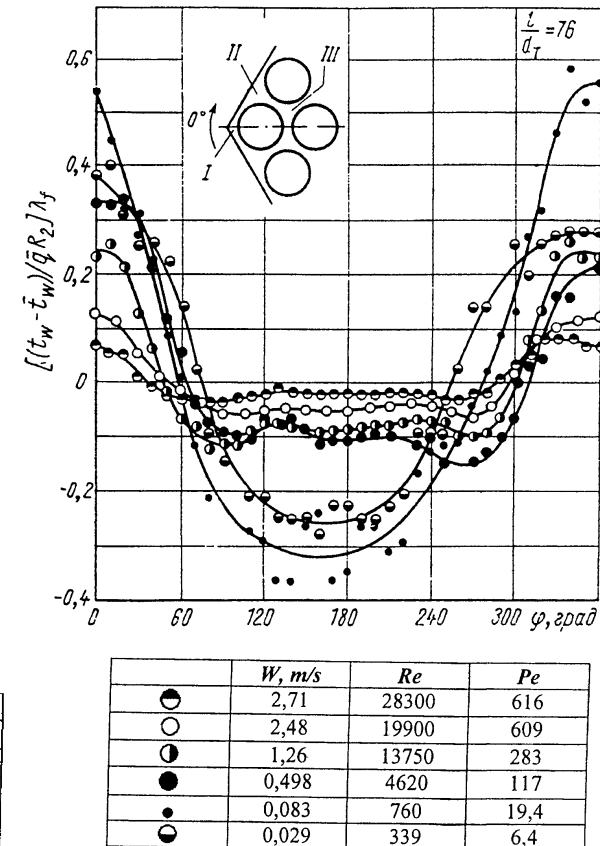
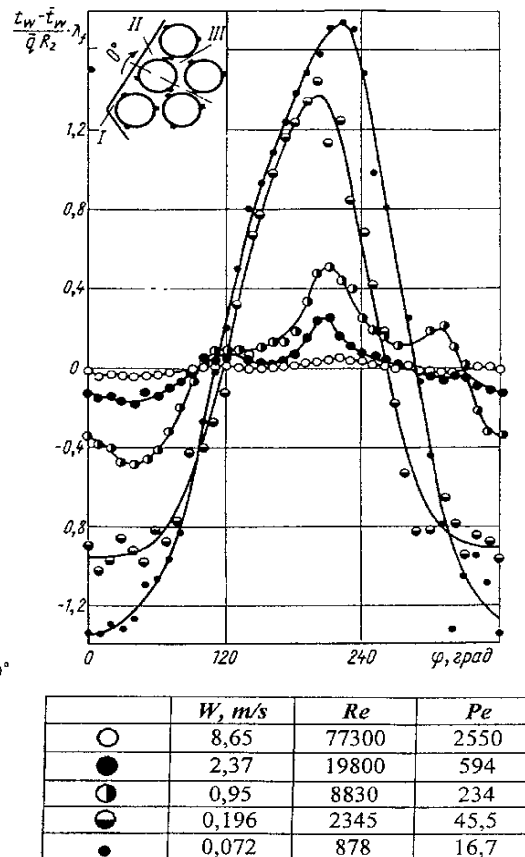
- – модель БОР-60 с оребренными элементами и вытеснителями ($s/d=1,10$; $\Delta/(s-d)=1,0$; натрий; $20 \geq Pe \geq 460$)
- – модель БОР-60 с неоребранными элементами без вытеснителей ($s/d=1,10$; $\Delta/(s-d)=1,0$; натрий; $20 \geq Pe \geq 460$)
- – модель БН-350 с оребренными элементами без вытеснителей ($s/d=1,15$; $\Delta/(s-d)=0,5$; натрий; $20 \geq Pe \geq 460$)
- – модель с неоребранными элементами без вытеснителей ($s/d=1,24$; $\Delta/(s-d)=0,5$; сплав натрий-калий)
- модель БН-350 с неоребранными элементами без вытеснителей ($s/d=1,15$; $\Delta/(s-d)=0,5$; натрий)

- ✓ Как правило наблюдается падение температуры жидкости в направлении периферии ТВС
- ✓ Наибольшие неравномерности температуры в ТВС с гладкими твэлами без вытеснителей
- ✓ Наименьшие неравномерности в ТВС с оребренными твэлами и вытеснителями

Распределение температуры по периметру твэлов в периферийной области ТВС

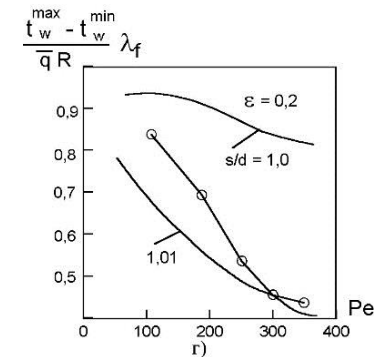
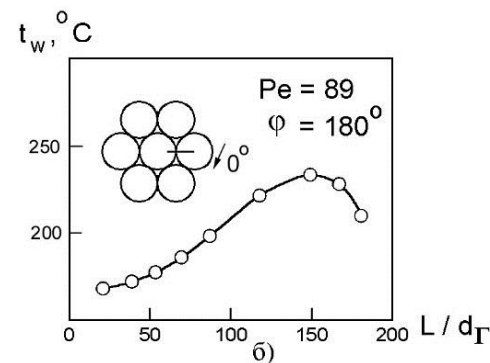
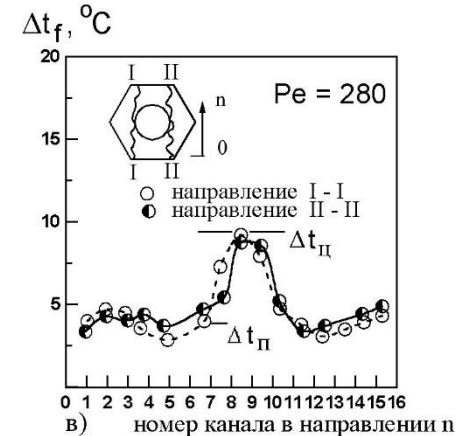
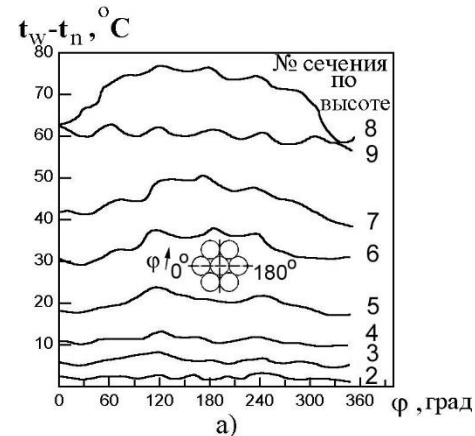
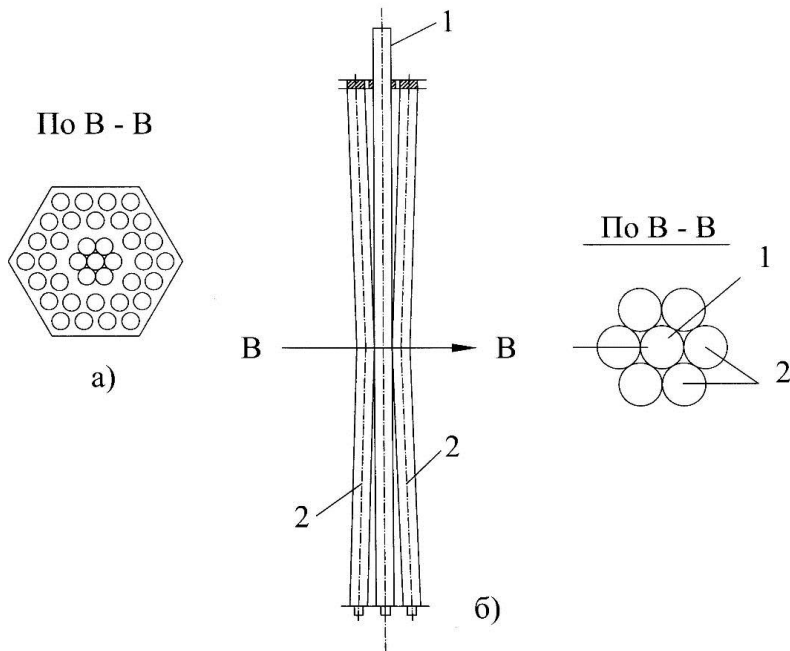


Распределение температуры по периметру боковых твэлов без оребрения и с оребрением



Распределение температуры по периметру углового твэла без оребрения

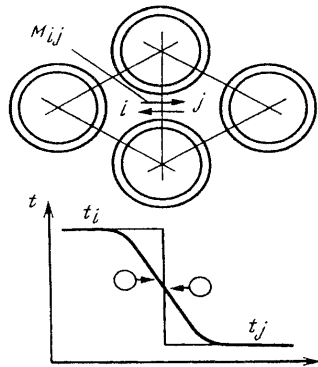
Температурное поле модельной ТВС при изгибе имитаторов твэлов в центральной области ТВС



Схемы поперечного (а) и продольного (б) сечений модельной ТВС быстрого реактора с прогибом имитаторов твэлов в центральной зоне:
 1 – центральный поворотный имитатор твэла;
 2 – деформированные имитаторы твэлов

Поле температуры по периметру и длине центрального имитатора твэла модели с прогнутыми имитаторами, распределение подогревов теплоносителя по сечению модели и сравнение безразмерных неравномерностей температуры центрального имитатора твэла с неравномерностями температуры решеток твэлов

Поперечный межканальный обмен массой, импульсом и энергией в сборках твэлов



$$\mu_{ij}^M = G_{ij} / G_{\Delta z}$$

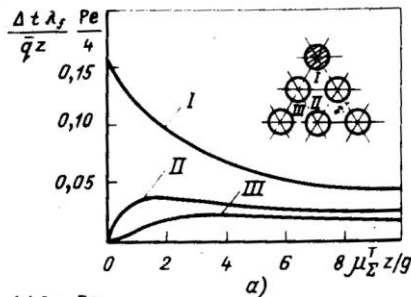
$$\mu_{ij}^{\Gamma} = \frac{P_{ij}}{G (W_i - W_j) \Delta z}$$

$$\mu_{ij}^T = \frac{Q_{ij}}{G c_p (t_i - t_j) \Delta z}$$

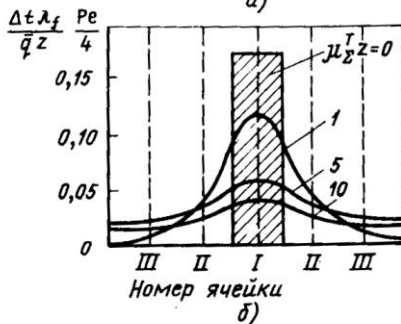
$$\mu_{\text{эф}}^{\Gamma} = \gamma \mu_{\text{MT}}^{\Gamma} + \mu_{\text{K}}^{\Gamma}$$

$$\mu_{\text{эф}}^T = \gamma \mu_{\text{MT}}^T + \mu_{\text{K}}^T + \mu_{\varepsilon}^T$$

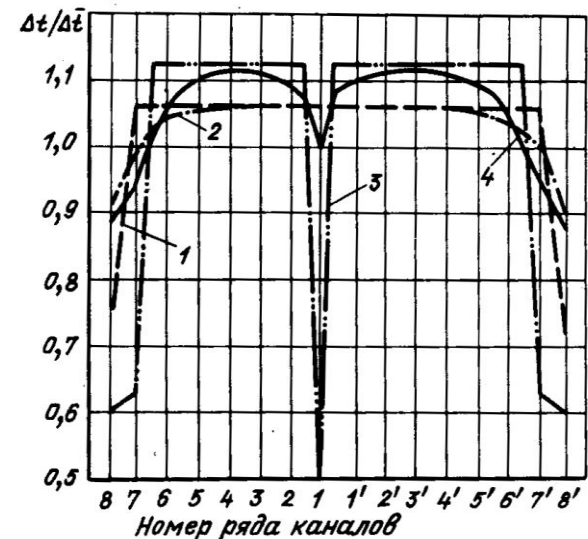
$$\gamma = \begin{cases} 1 - \frac{\mu_{\text{K}}}{2\mu_{\text{MT}}} + \frac{1}{4} \left(\frac{\mu_{\text{K}}}{2\mu_{\text{MT}}} \right)^2 & \text{при } \frac{\mu_{\text{K}}}{\mu_{\text{MT}}} \leq 4 \\ 0 & \text{при } \frac{\mu_{\text{K}}}{\mu_{\text{MT}}} > 4 \end{cases}$$



Изменение подогрева теплоносителя в зависимости от значения параметра межканального обмена (а) и по радиусу ТВС (б) при энерговыделении одиночного твэла; I-III – номера каналов



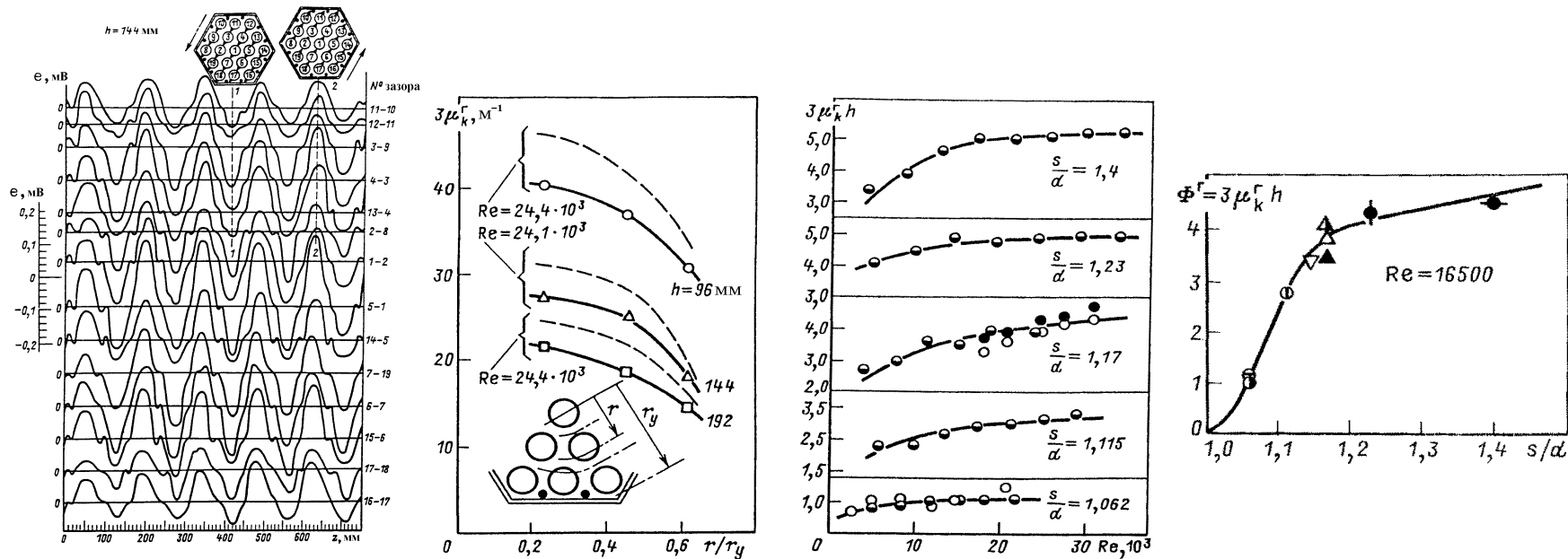
Распределение подогрева теплоносителя по сечению ТВС реактора БН-350 при постоянном энерговыделении в поперечном сечении ТВС: 1, 2 – ТВС без детекторов без учёта и с учётом межканального обмена, 3, 4 – ТВС с детектором без учёта и с учётом межканального обмена



Поперечный межканальный обмен массой, импульсом и энергией в сборках ТВЭЛов ядерных реакторов



Конвективный межканальный обмен в сборках твэлов, дистанционируемых проволоочной навивкой



$$\mu_{ij} = A \sin \varphi_{ij}$$

$$\Phi(s/d) = 2,57 s/d - 3,57 \exp[-119 (s/d - 1)^{2,12}] + 1$$

$$A = \frac{1,047}{h} \Phi(s/d) \Psi(Re)$$

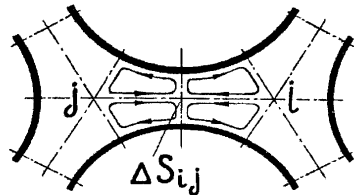
$$\Psi(Re) = 1,085 - 0,754 \exp(-0,132 \cdot 10^{-3} Re)$$

$$\mu_K^M = \frac{1,047}{\pi h} \Phi(s/d) \Psi(Re)$$

$$1,01 \leq s/d \leq 1,4 \quad 2 \leq h/d \leq 50 \quad 2 \cdot 10^3 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$$

φ_{ij} — угол навивки

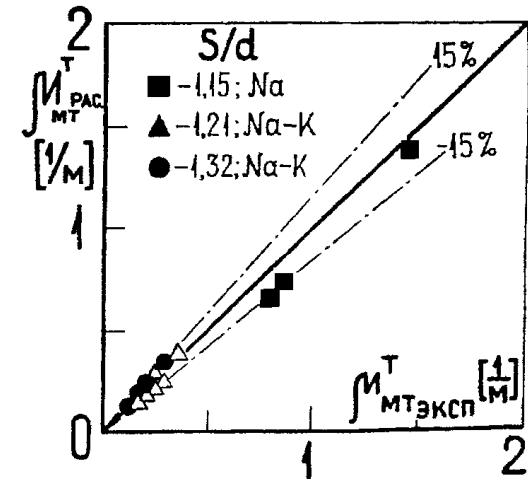
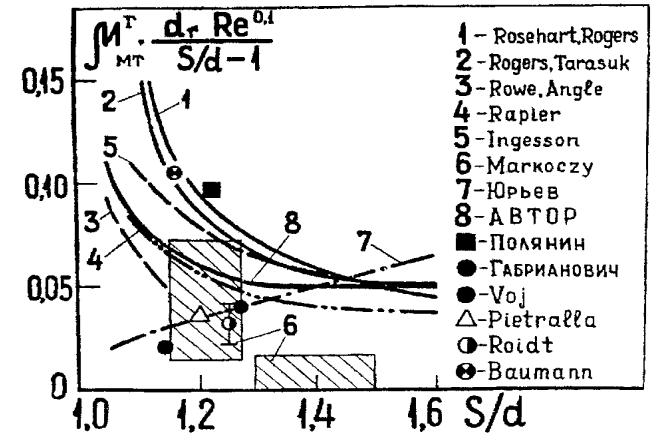
Молекулярно-турбулентный межканальный обмен



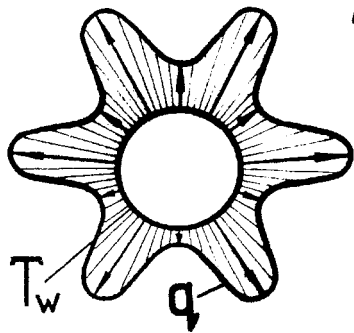
$$\int_{\Delta S_{ij}} \left[\rho(\epsilon + \epsilon_T) \frac{\partial c}{\partial n} - \rho \bar{c} \bar{w} \right] dS = \rho \left[(\epsilon + \epsilon_T) \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta r_{ij}} + \frac{W_{ij} \Delta S_{ij}^*}{2} \right] (C_j - C_i)$$

$$M_{MT}^T = \frac{[0,293 + 5,1(S/d - 1)] \cdot 10^{-2}}{d_r \cdot Re^{0,1}}, \quad \left[\frac{1}{M} \right]$$

$$M_{MT}^T = \left\{ \frac{8,85}{Pe} \frac{S}{d} - 1 + 3,2 \cdot 10^{-3} \frac{1 - \exp(-6,2 \cdot 10^{-5} Re Pr^{1/3})}{(S/d) \sqrt{S/d - 1}} + \frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{(d_r/d) Re^{0,1}} \right\} \frac{1}{d}, \quad \left[\frac{1}{M} \right]$$



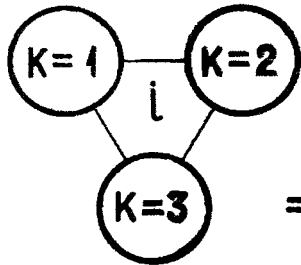
Межканальный обмен за счет теплопроводности ТВЭЛОВ



$$T_w = \bar{T}_w + \sum_m (a_m \sin m\varphi + b_m \cos m\varphi)$$

$$\frac{q_i}{\bar{q}} = 1 - \sum_m \varepsilon_m (a_m \sin m\varphi + b_m \cos m\varphi)$$

$$\bar{q}_{ki} / \bar{q}_k = Nu \frac{d}{2d_r} \cdot (T_w - T_i)$$

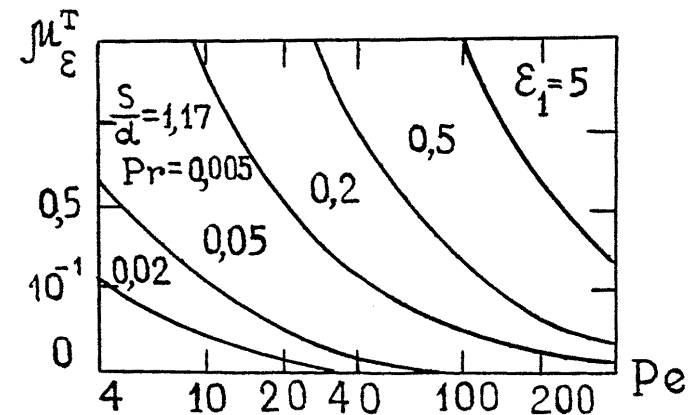
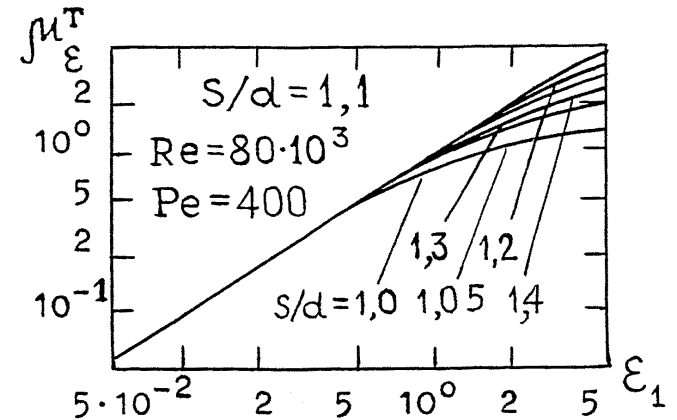


$$\sum_{k=1}^3 \bar{q}_{ki} \Pi_{ki} \Delta Z \approx \sum_{k=1}^3 \bar{q}_k \Pi_{ki} \Delta Z +$$

$$+ \sum_{k=1}^3 \frac{\lambda_f \Pi_{ki} \Delta Z}{(1/\varepsilon_i + 2d_r/Nu \cdot d)} \left[\left(\sum_{i=1}^6 \frac{t_i}{6} \right) - t_i \right] =$$

$$= \sum_{k=1}^3 \bar{q}_k \Pi_{ki} \Delta Z + \sum_{j=1}^3 M_\varepsilon^T \rho C_p W (t_j - t_i) \bar{w}$$

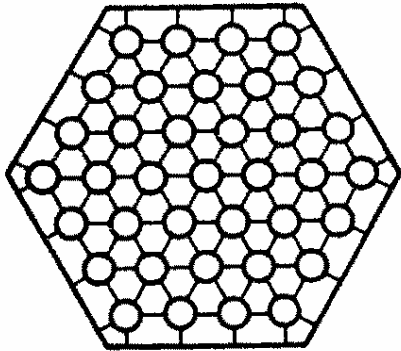
$$M_\varepsilon^T = \frac{16}{3} \left[\frac{\varepsilon_i}{1 + \varepsilon_i \cdot 2d_r / (Nu \cdot d)} \right] \cdot \frac{1}{Pe \cdot d} \left[\frac{1}{M} \right]$$



Система уравнений сохранения поканального теплогидравлического анализа для ТВС активной зоны реактора

Сохранение массы

$$\frac{\partial (\rho_i \omega_i \beta_{\tau i}^M)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_i W_i \omega_i)}{\partial z} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 [(\rho_i \beta_{ij}^M - \rho_j \beta_{ji}^M) |W_{ij}| + (\rho_i \beta_{ij}^M + \rho_j \beta_{ji}^M) W_{ij}] \Delta S_{ij} = \sum_{j=1}^3 \mu_{MT}^M \frac{W_i + W_j}{2} (\rho_j - \rho_i) \bar{\omega}$$

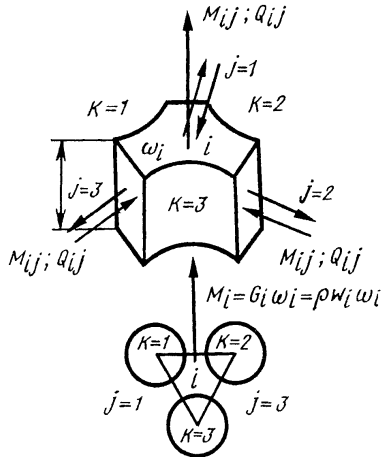


Сохранение импульса в продольном направлении

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_i W_i \omega_i \beta_{\tau i}^r)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\beta_{ij}^r \rho_i W_i^2 \omega_i)}{\partial z} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 [(\rho_i W_i \beta_{ij}^r - \rho_j W_j \beta_{ji}^r) |W_{ij}| + (\rho_i W_i \beta_{ij}^r + \rho_j W_j \beta_{ji}^r) W_{ij}] \Delta S_{ij} = \\ & - \frac{\partial (\rho_i \omega_i)}{\partial z} - [\lambda_i + k_i(z)] \frac{\rho_i W_i}{8} |W| \Pi_i - \rho_i g \omega_i \cos \vartheta + \sum_{j=1}^3 \mu_{MT}^r \frac{\rho_j + \rho_i}{2} \frac{W_i + W_j}{2} (W_j - W_i) \bar{\omega} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_i (V + V_T) \frac{\partial W_i}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

Сохранение импульса в поперечном направлении

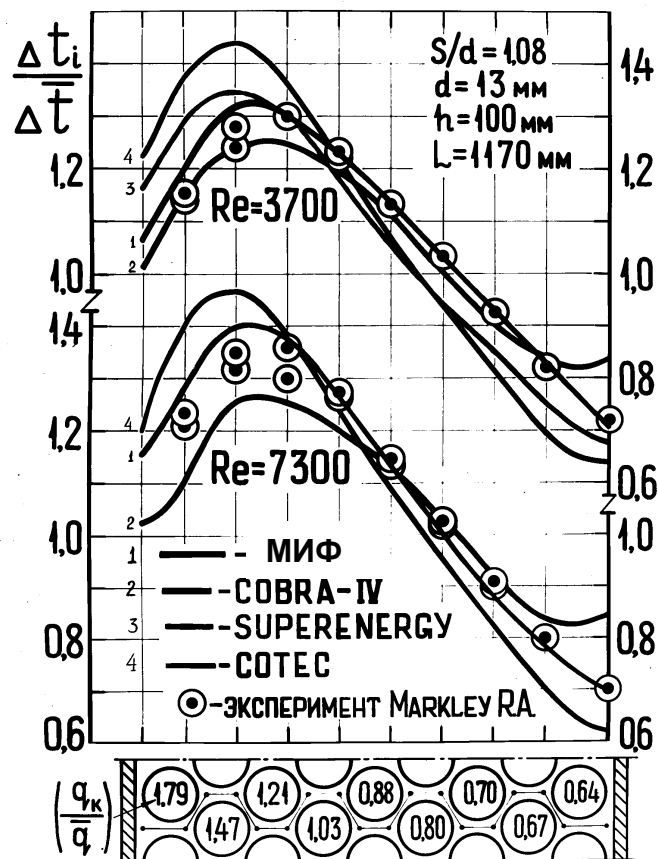
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\rho_i + \rho_j}{2} W_{ij} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta_{ij}^n \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \frac{W_i + W_j}{2} W_{ij} \right) + W_{ij} \left[\frac{1}{\omega_i} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_i W_i \omega_i) + \frac{1}{\omega_j} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_j W_j \omega_j) \right] = \\ & - \frac{3 \beta_p}{S_{ij}} (\rho_i - \rho_j) - \frac{3 \sqrt{3} C_{ij}}{S_{ij}} \frac{\rho_i + \rho_j}{2} W_{ij} |W| - \frac{\rho_i + \rho_j}{2} g \sin V + \frac{\rho_i + \rho_j}{2} f_{Mij} \end{aligned}$$



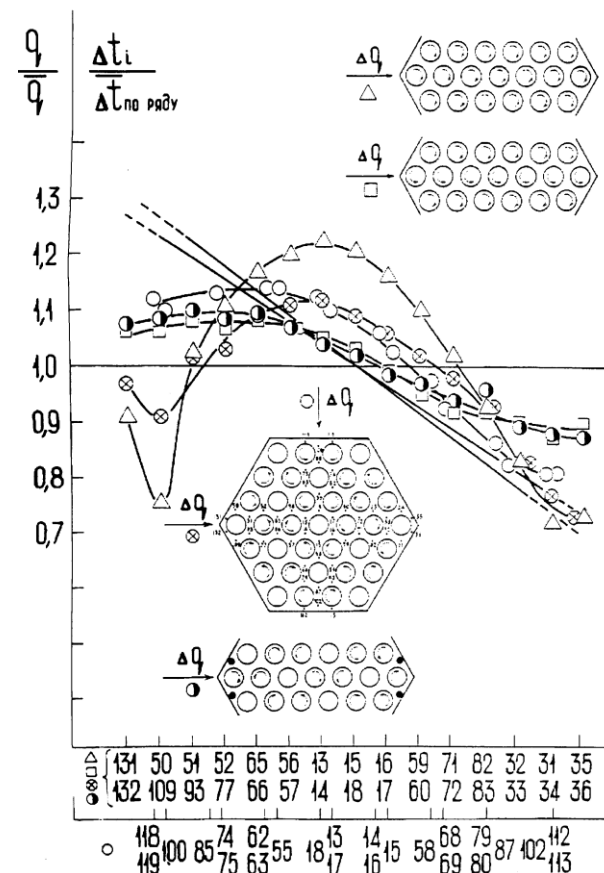
Сохранение энергии

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i W_i i_i) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_i W_i i_i \omega_i) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 [(\rho_i i_i \beta_{ij}^T - \rho_j i_j \beta_{ji}^T) |W_{ij}| + (\rho_i i_i \beta_{ij}^T + \rho_j i_j \beta_{ji}^T) W_{ij}] \Delta S_{ij} = \\ & = \sum_{j=1}^3 \bar{q}_{k_i} \Pi_{k_i} + \bar{q}_{v_i} \omega_i + \sum_{j=1}^3 \left[\mu_{MT}^T \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \frac{W_i + W_j}{2} + \mu_E^T \frac{\bar{\rho} \bar{W}}{(C_{pi} + C_{pj})/2 C_p} \right] (i_j - i_i) \bar{\omega} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda_f + \lambda_{Tz}}{C_{pi}} \omega_i \frac{\partial i_i}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Стандартная задача по теплогидравлике модельной ТВС с неравномерным энерговыделением в поперечном сечении

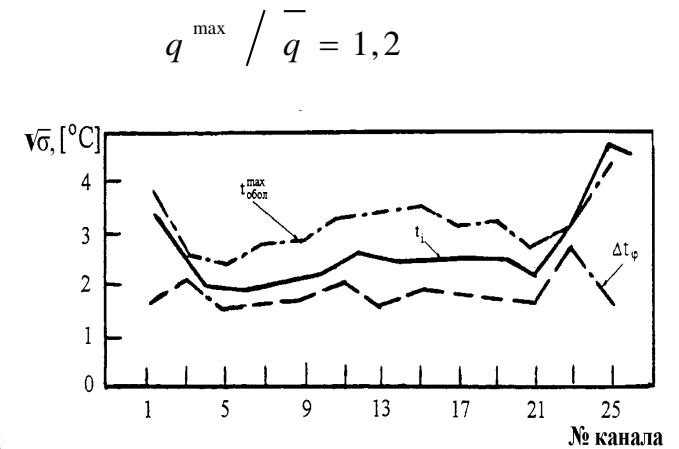
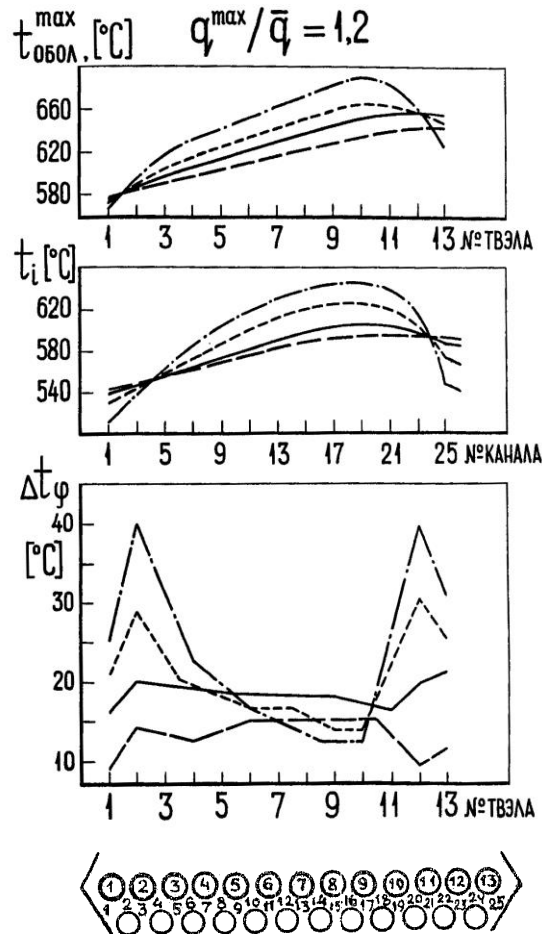
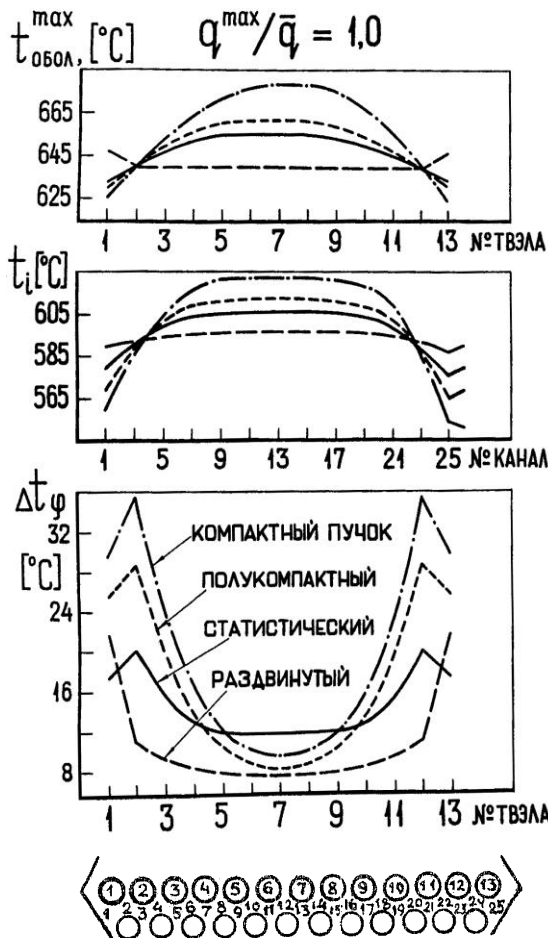


Сравнение результатов расчетов по кодам МИФ (1), COBRA-IV (2), SUPERENERGY (3), COTEC (4) с экспериментальными данными Markley R.A., Engel F.C.



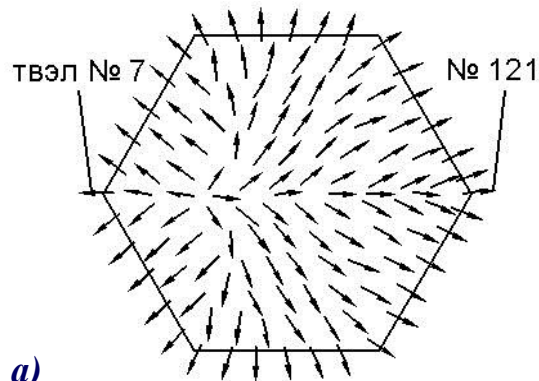
Распределение температуры в поперечном сечении ТВС для различных видов дистанционирования твэлов проволочной навивкой

Распределение температуры в поперечном сечении ТВС на выходе из активной зоны

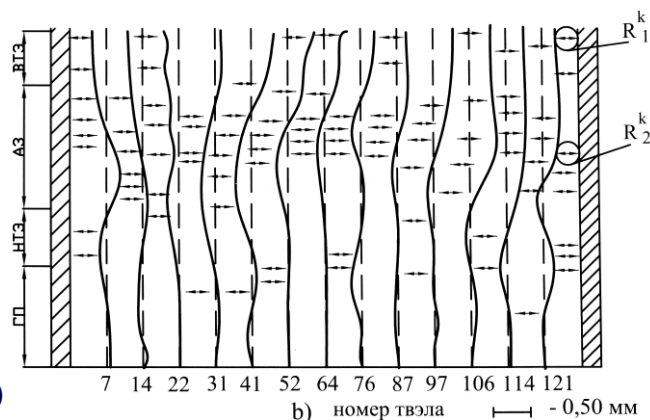


Дисперсия максимальной температуры оболочки твэлов (1), температуры (подогрева) теплоносителя (2), азимутальной неравномерности температуры твэлов (3)

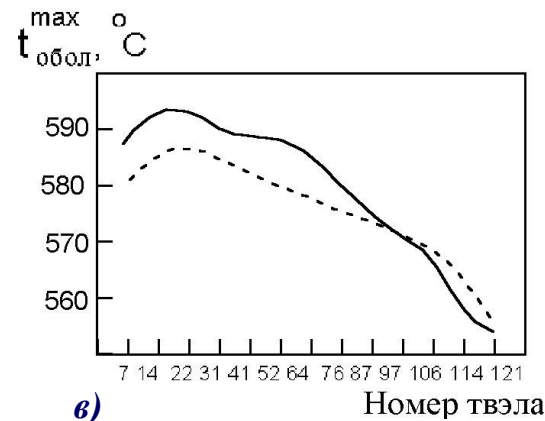
Термомеханический расчет ТВС в процессе облучения в активной зоне быстрого реактора по коду СДТ- МИФ



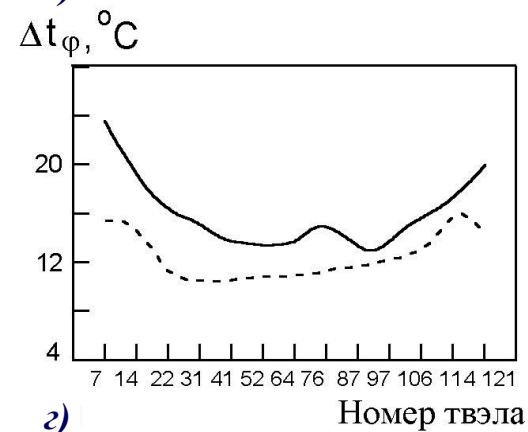
а)



б)



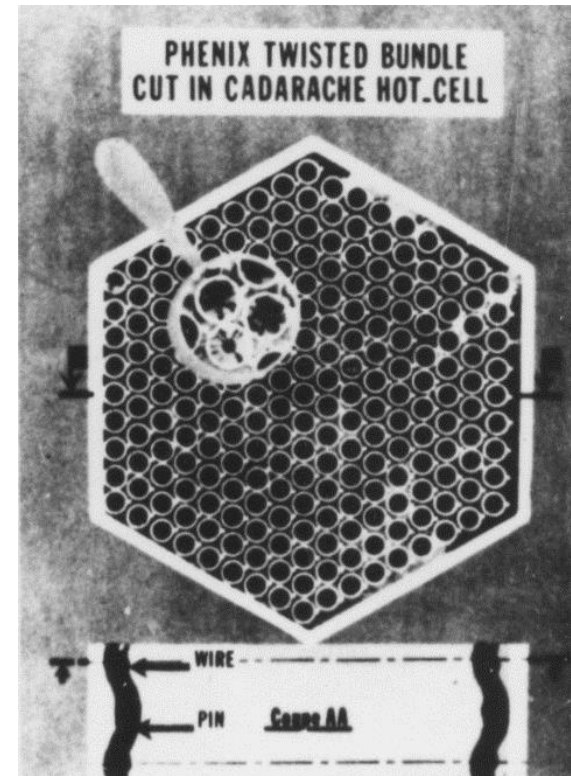
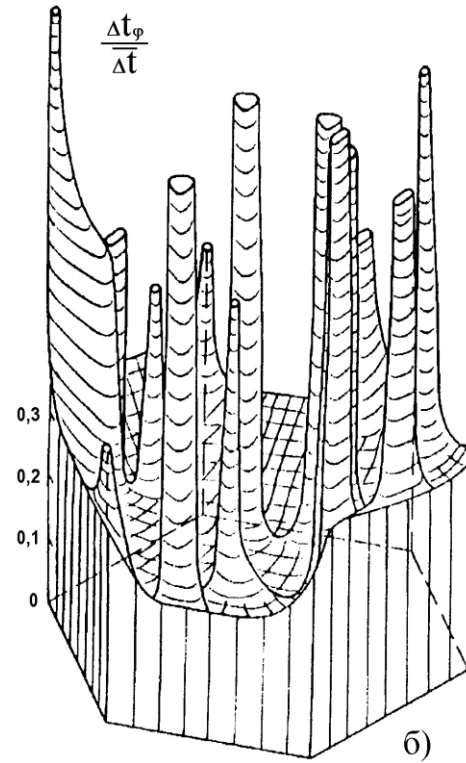
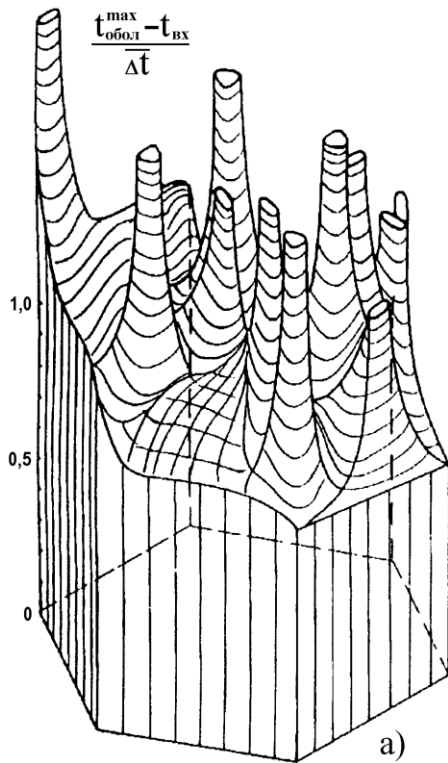
в)



г)

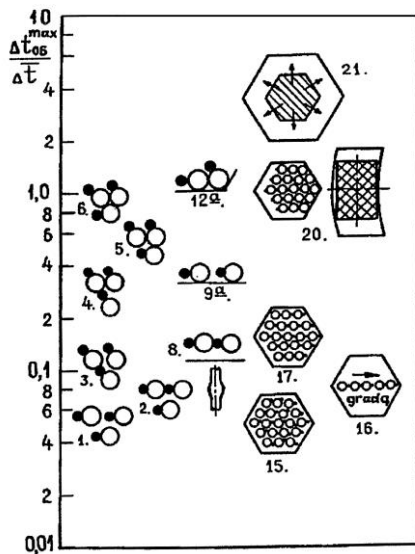
Распределение контактных сил (а) и равновесные смещения (б), вызванные изгибами и обмятием оболочки твэлов ТВС в конце третьей микрокампании облучения, распределения в диагональном сечении ТВС максимальной температуры оболочки твэлов (в) и максимальной азимутальной неравномерности температуры твэлов (г) на выходе из активной зоны ТВС реактора БН-600:
—— — с учетом формоизменения; - - - - исходная геометрия

Распределение максимальной температуры оболочки и азимутальной неравномерности температуры твэлов в поперечном сечении ТВС по центру активной зоны реактора «Феникс» на конец кампании

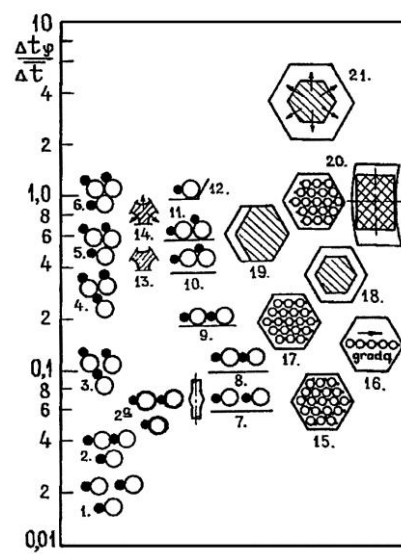


- ✓ **Значительное формоизменение**
- ✓ **Большие неравномерности температурного поля**
- ✓ **Значительные перегревы оболочки твэлов и азимутальные неравномерности температуры «в горячих пятнах»**

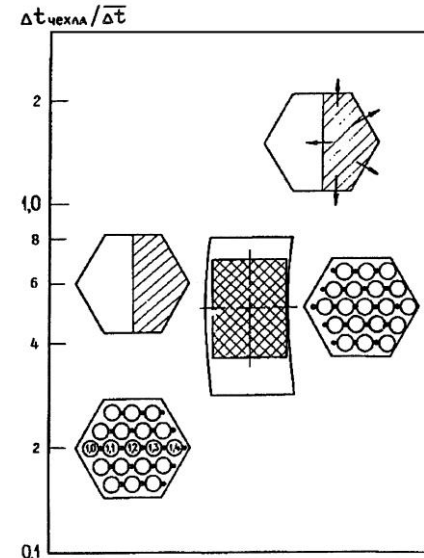
Влияние различных факторов на температурный режим твэлов и чехлов ТВС



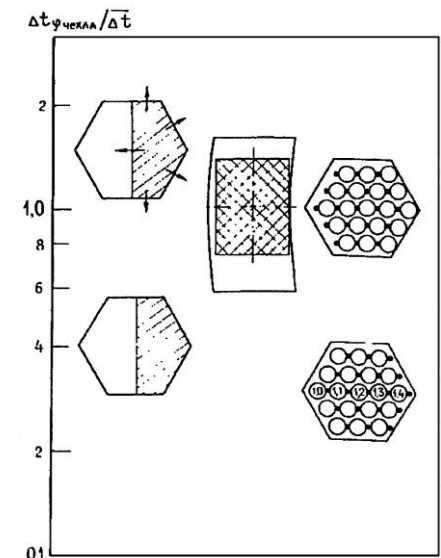
а)



б)



в)



г)

Влияние различных факторов на перегрев оболочки твэлов (а), увеличение азимутальной неравномерности температуры твэлов (б), максимальной температуры (в) и неравномерности температуры по периметру чехлов ТВС (г)

Заключение

Повышение уровня расчетного обоснования характеристик активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с ЖМТ требует проведения комплекса теплогидравлических исследований, направленных на:

- ✓ **изучение микроструктуры турбулентных течений, совершенствование моделирования турбулентных течений жидкометаллических теплоносителей с учетом крупномасштабных вихревых течений в каналах сложной формы и сборках твэлов реакторов на быстрых нейтронах, замыкающих соотношений для уравнений сохранения гидродинамики и теплообмена;**
- ✓ **получение базовых констант по теплоотдаче и полям температуры твэлов для всех условий и режимов работы (деформация геометрии, всплески энерговыделения, статистическое распределение параметров, факторы перегрева и т.д.);**
- ✓ **совершенствование и развитие численных методов теплогидравлического расчета и расчетных кодов для разных режимов работы оборудования ЯЭУ;**
- ✓ **обобщение полученных результатов экспериментальных и расчетных исследований, создание баз данных, разработку верификационных тестов, проведение стандартных задач, валидации методов расчета и верификации кодов.**

Спасибо за внимание

Сорокин Александр Павлович
Главный научный сотрудник, д.т.н.

Тел.: +7 (484) 399 84 47
Моб. тел.: +7 (905) 641 20 99
E-mail: apsorokin@ippe.ru
www.ippe.ru

14.07.2023