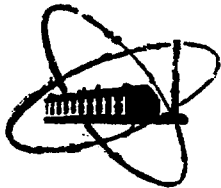


ФЭИ-1401



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

*Г. П. БОГОСЛОВСКАЯ, А. П. СОРОКИН, Б. Б. ТИХОМИРОВ,
П. А. ТИТОВ, П. А. УШАКОВ*

**Программа ТЕМП-М
теплогидравлического расчета кассет ТВЭЛОВ
быстрых реакторов**

Обнинск — 1983

УДК 621.039.517.5

Г. П. Богословская, А. П. Сорокин, Б. Б. Тихомиров, П. А. Тятюв,
П. А. Ушаков.

Программа ТЕМП-М теплогидравлического расчета кассет твэлов
быстрых реакторов.

ФЭИ-1401, Обнинск: ФЭИ, 1983. — 20с.

Дано описание методики и Фортран-программы ТЕМП-М теплогидравлического расчета кассет твэлов быстрых реакторов. Рассчитываются распределения подогревов теплоносителя, температуры твэлов (по периметру и по длине), температуры обечайки кассеты для распределенных случайным образом по методу Монте-Карло параметров пучка (проходные сечения каналов, энерговыделение твэлов) или для средних параметров пучка. Распределение подогрева теплоносителя по каналам кассеты находится из решения системы балансовых уравнений, учитывающих межканальный обмен, неадиабатические условия на обечайке кассеты. Программа ТЕМП-М дает необходимую информацию для выполнения расчетов прочности, работоспособности элементов активных зон быстрых реакторов, служит эффективным инструментом для проведения расчетов при проектировании активных зон и анализе теплогидравлических характеристик кассет твэлов действующих реакторов. Программа апробирована на экспериментальном материале. Демонстрируются результаты расчетов, выполненных по программе ТЕМП-М.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение энергонапряженности активных зон быстрых реакторов при обеспечении безаварийной работы при заданных параметрах выдвигает повышенные требования к точности расчета теплофизических характеристик кассет твэлов на стадии проектного обоснования быстрых реакторов.

Зоны быстрых реакторов, образованные шестигранными кассетами с цилиндрическими тепловыделяющими элементами с топливом (рис. 1), имеют несколько зон с различным обогащением ядерного топлива. Соответственно, в значительной группе кассет энерговыделение существенно неравномерное. Это создает неравномерность температуры по периметру обечаек и вызывает дополнительные неравномерности температуры по периметру тепловыделяющих элементов. Особенности геометрии периферийной области кассеты, возможные протечки теплоносителя в зазорах между кассетами обуславливают неравномерности температуры в периферийных областях кассет. Распределения сборочного (технологического) зазора между твэлами, весового содержания топлива в твэлах, а также других параметров, подчиняющиеся статистическим закономерностям, приводят к дополнительным локальным неравномерностям температуры по периметру твэлов.

Воздействие этих и других факторов создает сложную картину температурного поля тепловыделяющих элементов и обечаек кассет. Значительное выравнивающее воздействие на температурное поле оказывает интенсивный конвективный обмен, имеющий место в сборках твэлов быстрых реакторов с дистанционированием элементов проволоочной навивкой.

Корректный учет воздействия различных факторов на температурное поле, учет воздействия межканального обмена на температурное поле является необходимым требованием к современному теплофизическому расчету сборок твэлов быстрых реакторов.

Программа ТЕМП-М учитывает влияние на температурное поле кассет твэлов перечисленных параметров. Она позволяет получить распределенные и осредненные характеристики температурного поля совокупности кассет твэлов быстрого реактора. Рассчитывая распределения температуры оболочки каждого из твэлов и обечаек кассет, программа ТЕМП-М не только показывает границы температурных режимов кассет твэлов быстрого реактора, но и даёт необходимую информацию для выполнения расчетов прочности, работоспособности элементов

конструкции зоны. Программа ТЕМП-М может быть использована в комплексах физического, теплофизического и прочностного расчета быстрых реакторов.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Температура оболочки твэлов быстрых реакторов определяется в наиболее характерных точках периметра твэлов (в узкой и широкой частях каналов) как суперпозиция температуры теплоносителя в каналах, перепада температуры стенка-жидкость, перегрева теплоносителя под ребрами, локальных отклонений температуры от средних значений в пределах каналов, перепада температуры на оболочках твэлов.

Таким образом, значение температуры оболочки K -го твэла в i -ом канале выражается следующим образом:

в узкой части каналов

$$(t_{kij})_3 = \frac{(t_{ki})_3 + (t_{kj})_3}{2} \quad (1)$$

$$\text{где } (t_{ki})_3 = t_i + \frac{q(z)d}{\lambda_f} \left(\frac{dr/d}{Nu_z} + \frac{Z}{Z+1} \frac{\Delta T_{\varphi z}}{2} + \frac{\Delta T_p}{2} + \frac{\lambda_f \delta_w}{\lambda_w d} \right) \quad (2)$$

в широкой части каналов

$$(t_{ki})_4 = t_i + \frac{q(z)d}{\lambda_f} \left(\frac{dr/d}{Nu_z} - \frac{1}{Z+1} \frac{\Delta T_{\varphi z}}{2} + \frac{\Delta T_p}{2} + \frac{\lambda_f \delta_w}{\lambda_w d} \right) \quad (3)$$

Максимальное значение температуры оболочки твэла определяется наибольшим значением температуры оболочки в узкой части каналов (в зазорах между твэлами)

$$t_{\text{к обол}}^{\max} = \max_{ij} \{ (t_{kij})_3 \} \quad (4)$$

Значение неравномерности температуры по периметру твэлов определяется разностью между максимальной и минимальной температурами оболочки:

$$\Delta t_{\varphi} = t_{\text{обол}}^{\max} - t_{\text{обол}}^{\min} \quad (5)$$

$$\text{где } t_{\text{обол}}^{\max} = \min_i \{ (t_{ki})_4 \} \quad (6)$$

Наиболее сложной, требующей основных затрат машинного времени, является процедура расчета распределения температуры теплоноси-

теля по каналам кассеты. Наличие значительных участков торцевых экранов позволяет использовать приближение стабилизированного режима течения на участке активной зоны, что существенно сокращает время выполнения расчетов.

Распределение температуры теплоносителя находится путем решения системы уравнений баланса энергии для каналов кассеты:

внутренний канал

$$\frac{d}{dz}(w_i t_i w_i) = \frac{1}{\rho c_p} \sum_{k=1}^3 \bar{q}_k \Pi_{ki} + \sum_{j=1}^2 \left[M_j^T \bar{w} + (M_{MT}^T + M_k^T) \frac{w_l + w_j}{2} \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta S_0} (t_j - t_l) w_0 \right], \quad (7)$$

боковой канал

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz}(w_i t_i w_i) = & \frac{1}{\rho c_p} \sum_{k=1}^2 \bar{q}_k \Pi_{ki} + \sum_{j=1}^2 (M_j^T \bar{w} + M_{MT}^T \frac{w_l + w_j}{2} \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta S_0}) (t_j - t_l) w_0 + \\ & + M_k^T \frac{w_l + w_2}{2} \frac{\Delta S_{12}}{\Delta S_0} (t_2 - t_l) w_0 + M_k^T \left(\frac{w_l + w_l}{2} \frac{\Delta S_{11}}{\Delta S_0} t_1 - \right. \\ & \left. - \frac{w_l + w_2}{2} \frac{\Delta S_{12}}{\Delta S_0} t_l \right) w_0 + M_{13}^T \bar{w} \frac{S_1}{S_0} (t_3 - t_l) w_0, \end{aligned} \quad (8)$$

угловой канал

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz}(w_i t_i w_i) = & \frac{1}{\rho c_p} \bar{q}_k \Pi_{ki} + \sum_{j=1}^2 (M_j^T \bar{w} + M_{MT}^T \frac{w_l + w_j}{2} \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta S_0}) \times \\ & \times (t_j - t_l) w_0 + M_k^T \left(\frac{w_l + w_l}{2} \frac{\Delta S_{11}}{\Delta S_0} t_1 - \frac{w_l + w_2}{2} \frac{\Delta S_{12}}{\Delta S_0} t_l \right) w_0 + \\ & + M_{13}^T \bar{w} (t_3 - t_l) (1 + 2\Delta/d) w_0 / \sqrt{3}, \end{aligned} \quad (9)$$

канал в межкассетном зазоре

$$\frac{d}{dz}(w_i t_i w_i) = \sum_{l=1}^2 M_{13}^T \bar{w} (t_l - t_3) w_0 + \sum_{l=1}^2 \frac{\delta/S}{\rho c} \bar{w} (t_l - t_3) w_0. \quad (10)$$

Энерговыделение твэлов задается по закону Фурье с использованием процедуры Тейчроева, описанной в работе [1].

Распределение проходных сечений каналов реализуется согласно данным [2] по закону Вейбулла с использованием генератора случайных чисел (γ), на отрезке [0,1]:

$$\omega = \omega^{\min} + \omega_p^{\min} a \left(\ln \frac{1}{1-\gamma} \right)^{1/\beta} \quad (II)$$

где ω^{\min} — минимальный размер проходного сечения канала, реализующийся в рассматриваемой сборке; ω_p^{\min} — минимально возможный расчетный размер проходного сечения канала; a, β — параметры распределения. Распределение расхода теплоносителя по каналам кассеты находится из решения системы уравнений баланса количества движения с учетом обмена количеством движения между каналами [3].

Значения коэффициентов межканального обмена теплом определяются по соотношениям, приведенным в работах [4-6]. Значения безразмерных критериев и параметров ($Nu, \Delta T_f, \Delta T_p, Z$) в формулах (2), (3) определяются по соотношениям, приведенным в работах [7-9]. Температура обечайки кассеты со стороны периферийных каналов определяется по следующему соотношению:

$$t_1 = t_i + (t_3 - t_i) \frac{1}{1 + \frac{\lambda_f}{\lambda_{обеч}} \frac{\delta}{d_{гб}} Nu_B + \frac{Nu_B}{Nu_3} \frac{\delta'}{d_{гб}}} \quad (12)$$

Перепад температуры на обечайке в случае теплоотдачи к протечке теплоносителя в межкассетных зазорах определяется следующим образом:

$$t_1 - t_2 = \frac{t_i - t_3}{\frac{\lambda_{обеч}}{\lambda_f} \frac{d_{гб}}{\delta} \frac{1}{Nu_B} + 1 + \frac{\lambda_{обеч}}{\lambda_f} \frac{\delta'}{\delta} \frac{1}{Nu_3}} \quad (13)$$

ПРОГРАММА РАСЧЕТА

Реализация методики в программе ТЕМП-М представлена блок-схемой программы на рис. 2. В программе выполняется последовательный расчет температурного поля кассет твэлов активной зоны (зоны восприимчивости и т.д.).

Для каждой из кассет возможно выполнение или номинального (по средним параметрам пучка) или статистического (по распределенным параметрам) расчета теплогидравлических характеристик кассет. При статистическом расчете кассет твэлов выполняется последовательный

расчет температурных полей различных вариантов кассет твэлов с распределенными случайным образом проходными сечениями каналов и энерговыделением твэлов, а также статистическая обработка результатов — нахождение математического ожидания и дисперсии максимальной температуры оболочек твэлов, подогрева теплоносителя в каналах и неравномерности температуры по периметру твэлов. Критерием окончания статистического расчета кассеты твэлов является сходимость математического ожидания подогрева, максимальной температуры оболочек твэлов, неравномерности температуры по периметру твэлов:

$$|\tilde{t}_i^n - \tilde{t}_i^{n-1}| \leq 0,001 \tilde{t}_i^n, \quad (14)$$

$$|\tilde{t}_{\text{к обол}}^{\text{max } n} - \tilde{t}_{\text{к обол}}^{\text{max } n-1}| \leq 0,001 \tilde{t}_{\text{к обол}}^{\text{max } n}, \quad (15)$$

$$|\Delta \tilde{t}_\varphi^n - \Delta \tilde{t}_\varphi^{n-1}| \leq 0,01 \Delta \tilde{t}_\varphi^n, \quad (16)$$

где \tilde{t} — математическое ожидание случайной величины. Как правило, для этого достаточно 40 вариантов расчета. Варианты расчета кассет твэлов в зоне реактора отличаются расходом, среднемассовым подогревом и неравномерностью энерговыделения в поперечном сечении кассеты. Задается линейная неравномерность энерговыделения с максимальным и минимальным энерговыделением угловых твэлов, расположенных на диагоналях кассеты. Значения параметров и неизвестных записываются в двумерные массивы, в которых первый индекс — вертикальный ряд каналов или твэлов, а второй индекс — горизонтальный ряд каналов или твэлов. Размерность массивов для каналов $2N$ ($4N-2$), для твэлов $(2N-1)^2$.

При решении системы уравнений баланса энергии методом конечных разностей по явной схеме сначала пробегаются внутренние каналы кассеты, затем боковые и угловые каналы. Использование переменной индексации позволяет сократить расчетное время решения системы уравнений баланса, например, для кассеты твэлов реактора типа БН-600 в 5 - 10 раз по сравнению с матричным методом решения системы уравнений [11].

Обработка результатов расчета и выдача параметров на печать могут производиться с любым шагом по длине активной зоны. Программа позволяет получить ряд распределений: число каналов, имеющих определенный подогрев; число твэлов, имеющих определенную максимальную температуру оболочки, неравномерность температуры по периметру твэлов. Распределения рассчитываются как для случайных

величин, так и для математического ожидания величин.

Время расчета одного варианта кассеты твэлов реактора БН-600 при случайном изменении параметров кассеты на ЭВМ БЭСМ-6 составляет ~ 10 минут, по средним параметрам пучка ~ 20 секунд, а соответственно, активной зоны не более 30 минут.

Описания идентификаторов ввода и вывода даны в приложении.

Апробация программы на экспериментальном материале и сопоставление с результатами расчета по другим программам

Результаты расчета по программе TEMI-M апробированы на имеющемся экспериментальном материале для модельных сборок твэлов быстрых реакторов. Наблюдается удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных (работы [7, 12]) распределений скорости и подогрева теплоносителя по радиусу модельныхборок твэлов быстрых реакторов (рис. 3). Для соотношения между скоростями и подогревами теплоносителя в боковых и центральных каналах наблюдается согласование расчетных и экспериментальных значений с точностью $\pm 10\%$ (рис. 4-а, б). Для неравномерности температуры по периметру боковых твэлов в модельных кассетах наблюдается согласование результатов расчета и эксперимента с точностью $\pm 10\%$ (рис. 4-в).

Сравнение результатов расчета по программе TEMI-M с экспериментальными данными Markley R.A. [13] для сборки с неравномерным энерговыделением в поперечном сечении кассеты указывает на их удовлетворительное согласование (рис. 5). Среднее квадратичное отклонение рассчитанных по программе TEMI-M распределений подогрева от экспериментальных данных Markley R.A. составляет $\sim 0,8\%$.

Сравнение, проведенное в работе [13] и показанное на рис. 5, экспериментальных данных Markley R.A. с результатами расчетов по программам COTEC [14], COBRA-IV [15], SUPERENERGY [16], являющихся одними из наиболее развитых зарубежных программ теплогидравлического расчета кассет твэлов быстрых реакторов [5], показывает их определенное расхождение. Среднее квадратичное отклонение расчетных зависимостей подогрева от экспериментальных данных Markley R.A. составляет при расчете по программам COTEC $\sim 4,5\%$, COBRA-IV $\sim 2,6\%$, SUPERENERGY $\sim 2,7\%$.

Некоторые результаты расчета по программе ТЕМП-М

Результаты расчета по программе ТЕМП-М температурного поля в 127 твэльной кассете реактора типа БН-600 (параметры сборки твэлов приведены в работе [2]) в случае неравномерного энерговыделения твэлов в поперечном сечении кассеты представлены на рис. 6. Максимальная температура оболочки твэлов в кассете имеет место в зоне наибольшего энерговыделения. Учет межканального обмена позволяет уточнить расчетные значения температуры твэлов на величину до 20°C . Максимальные значения неравномерности температуры по периметру твэлов наблюдаются у твэлов периферийного и предпериферийного рядов и составляют $\sim 20^{\circ}\text{C}$.

Протечка теплоносителя в межкассетных зазорах интенсивностью 2 % от расхода теплоносителя в кассете обуславливает небольшое снижение максимальной температуры оболочки твэлов в периферийной области кассеты и некоторое увеличение неравномерности температуры по периметру периферийных твэлов в кассете.

Средние квадратичные отклонения максимальной температуры оболочек твэлов вследствие случайного изменения проходных сечений каналов и энерговыделения тепловыделяющих элементов составляют $2+4^{\circ}\text{C}$, а для неравномерности температуры по периметру твэлов $\sim 2^{\circ}\text{C}$. Учет межканального обмена позволяет уточнить расчетные значения средних квадратичных отклонений максимальной температуры оболочек твэлов \sim в 2 раза, а для неравномерности температуры по периметру твэлов в 4 + 7 раз.

О б о з н а ч е н и я

- t - температура, $^{\circ}\text{C}$;
- Δt_{ϕ} - неравномерность температуры по периметру твэлов, $^{\circ}\text{C}$;
- q - плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
- z - продольная координата, м;
- d - наружный диаметр твэла, м;
- S - шаг решетки твэлов, м;
- d_r - гидравлический диаметр канала, м;
- δ_w - толщина оболочки твэла, м;
- L - длина активной зоны, м;
- Π - смоченный периметр, м;
- ΔS - ширина зазора между твэлами, м;

- Δ - ширина зазора между обечайкой и периферийными твэлами, м;
 δ - толщина обечайки кассеты, м;
 δ' - ширина межкассетного зазора, м;
 d_{np} - диаметр дистанционирующей проволочной навивки на твэлах, м;
 d_B - диаметр вытеснителей в периферийных каналах кассеты, м;
 ω - площадь проходного сечения канала, м²;
 w - скорость теплоносителя, м/с;
 μ - коэффициент межканального обмена, м⁻¹;
 Re, Pr, Pe - числа Рейнольдса, Прандтля, Пекле, соответственно;
 i, j - индексы каналов в кассете;
 ψ - индекс каналов в межкассетных зазорах;
 K - индекс твэла; конвективный обмен;
 ξ - индекс зазоров между твэлами;
 T - тепловой;
 MT - молекулярно-турбулентный обмен;
 ϵ - обмен за счет теплопроводности твэлов;
 O - индекс центрального канала;
 Π - индекс зазора между периферийными твэлами;
 B - индекс бокового канала или твэла;
 $OBOL$ - оболочка твэла;
 BX - вход в активную зону;
 p - проволочная навивка на твэлах;

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_r}{\lambda_f}; \quad \Delta T_{\varphi} = \frac{t^{\max} - t^{\min}}{\bar{q} \cdot (d/2)} \cdot \lambda_f$$

$$\Delta T_p = \frac{\Delta t \cdot \lambda_f}{\bar{q} \cdot (d/2)}; \quad Z = \frac{t_w^{\max} - \bar{t}_w}{\bar{t}_w - t_w^{\min}}$$

Список литературы

1. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ (получисленные алгоритмы). Т. 2, М., Мир, 1977, с. 140.
2. Метод расчета температурного поля в кассете твэлов быстрого реактора при случайном распределении параметров по методу Монте-Карло. - Препринт ФЭИ - 1340, Обнинск, 1982. Авт.: Г.Л. Богословская, А.В. Жуков, В.М. Поплавский, А.П. Сорокин, В.В. Тихомиров, П.А. Ушаков.
3. Влияние межканального обмена на выравнивание полей скорости и температуры в кассетах твэлов. - Препринт ФЭИ-1062, 1980. Авт.: А.В. Жуков, А.П. Сорокин, П.А. Ушаков, Ю.С. Юрьев.
4. Сравнение коэффициентов межканального перемешивания при различных способах винтового оребрения стержней. - Препринт ФЭИ-1158, Обнинск, 1981. Авт.: А.В. Жуков, Н.М. Матюхин, К.С. Рымкевич, Е.Я. Свириденко, П.А. Ушаков.
5. Методы и программы поканального теплогидравлического расчета сборов твэлов с учетом межканального взаимодействия теплоносителя. - Аналитический обзор ОБ-107, Обнинск, 1980. Авторы: А.В. Жуков, Ю.Н. Корниенко, А.П. Сорокин, П.А. Ушаков, Ю.С. Юрьев.
6. Межканальное тепловое взаимодействие в пучках гладких стержней; обтекаемых жидкими металлами. - Препринт ФЭИ-757, Обнинск, 1977. Авторы: А.В. Жуков, Л.К. Кудрявцева, В.Г. Митрошин, Л.В. Соколова.
7. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М., Атомиздат, 1975. Авт.: В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев.
8. Жуков А.В., Кириллова Г.П. Расчет температурных полей на начальном участке решеток твэлов, обтекаемых турбулентным потоком жидкометаллического теплоносителя. - Препринт ФЭИ-715, Обнинск, 1976.
9. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Свириденко Е.Я. Температурные поля и теплоотдача в периферийных зонах шестигранных кассет твэлов быстрых реакторов. - В сб.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Реакторостроение", Обнинск, ОНТИ ФЭИ, 1977, выпуск 4 (18), с. 5-7.
10. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М., Мир, 1972, с. 211 - 212.
11. Поттер, А. Вычислительные методы в физике. Пер. с англ. М., Мир, 1975, с. 284-290.
12. Поля скоростей в твэльных сборках быстрых реакторов при изменении геометрии периферийных зон. В сб.: Теплофизические исследования. М., ВИНИИ, 1977, с. 5-7. Авт.: А.В. Жуков, В.Я. Свириденко, Н.М. Ма-

ТЮХИН, А.П. Сорокин, Н.А. Котовский, К.С. Рымкевич.

13. Markley R.A., Engel F.C. LMFBR Blanket Assembly Heat Transfer and Hydraulic Test Data Evaluation. In: Thermodynamics of FBR Fuel Sub-assemblies under Nominal and Non-nominal Operating Conditions. Summary Report IWGFR/29, Vienna, IAEA, 1979, p.229-253.
14. Novendstern E.H. Mixing Model for Wire Wrap Fuel Assembly. — Transactions of the American Nuclear Society, 1972, v.15, №2, p.866-867.
15. Stewart C.W., Rowe D.C. Advanced Continuous Fluid Eulerian Computation Scheme for Flows with Large Density Gradients. — Transactions of the American Nuclear Society, 1976, v. 24, №1, p. 178.
16. Chen B.C., Todreas N.E. Prediction of the Coolant Temperature Field in a Breeder Reactor Including Interassembly Heat Transfer. — Nuclear Engineering and Design, 1975, v. 35, № 3, p.423-440.

Описание идентификаторов ввода

- N** - число рядов твэлов от центра до обечайки кассеты,
SD - относительный шаг решетки твэлов (S/d),
DBT - относительное значение диаметра вытеснителей в периферийных каналах (d_B/d),
DP1 - относительное значение диаметра проволочной навивки (d_{np}/d),
DD - относительное значение расстояния между обечайкой и периферийными твэлами (Δ/d),
DP2 - относительное значение ширины дистанционирующей ленты на периферийных твэлах,
BK1 - коэффициент в формуле расчета неравномерности энерговыделения по длине активной зоны (β),
BK2 - длина активной зоны (L),
H - шаг дистанционирующей проволочной навивки (h),
KP - относительное значение коэффициента теплопередачи через обечайку кассеты,
GKS - относительный расход теплоносителя в межкассетных зазорах,
KF - коэффициент в правой части в соотношении (I2),
D - наружный диаметр оболочки твэла (d),
D1 - внутренний диаметр оболочки твэла,
LPF - коэффициент теплопроводности теплоносителя (λ_f),
LPW - коэффициент теплопроводности оболочки твэла (λ_w),
EPS6 - параметр теплового моделирования твэлов, рассчитанный по 6-ой гармонике (ϵ_6),
RE - среднее значение числа Рейнольдса (Re),
PR - значение числа Прандтля (Pr),
PECR - среднее значение числа Пекле (Pe),
TBX - температура теплоносителя на входе в активную зону,
AA - градиент энерговыделения (q''/q),

- TCR** - средний подогрев теплоносителя в кассете на выходе из активной зоны (Δt),
- ME** - коэффициент теплового межканального обмена за счет теплопроводности твэлов и молекулярно-турбулентного обмена ($\int_{E}^{T} + \int_{MT}^{T}$),
- KK1** - суммарный коэффициент теплового межканального обмена для центральной области кассеты ($\int_{K}^{T} + \int_{E}^{T} + \int_{MT}^{T}$),
- KK2** - коэффициент межканального обмена через обечайку кассеты (\int_{i3}^{T}),
- KK3** - суммарный коэффициент теплового межканального обмена между периферийными каналами ($\int_{K}^{Tn} + \int_{E}^{T} + \int_{MT}^{Tn}$),
- BES** - математическое ожидание энерговыделения твэлов,
- SIGMA** - дисперсия энерговыделения твэлов, **FUND1**, **FUND2**, **FUND3** - значения ω^{min} для центрального, бокового и углового каналов, соответственно,
- A1, A2, A3** - значения ($\omega_p^{min} a$), а для центрального, бокового и углового каналов, соответственно,
- B1, B2, B3** - значение (b) в формуле (II),
- MTK** - число вариантов, рассчитываемых по методу Монте-Карло.

Описание идентификаторов вывода

- Q(KL)** - относительное энерговыделение твэлов,
- QQ(KL)** - относительное энерговыделение в каналы,
- G(KL)** - относительный расход теплоносителя в каналах,
- TT(KL)** - температура теплоносителя в каналах,
- TK(K,L)** - температура теплоносителя в межкассетных зазорах,
- TF(K,L)** - температура обечайки кассеты,
- Q1(K,L)** - максимальная температура оболочки твэлов,
- Q2(K,L)** - неравномерность температуры по периметру твэлов,
- TRM(K,L), TRM1(K,L), TRM2(K,L)** - математическое ожидание подогрева теплоносителя в каналах, максимальной температуры оболочки твэлов, неравномерности температуры по периметру твэлов, соответственно,

$TDI(K,L)$, $TDI1(K,L)$, $TDI2(K,L)$ - среднее квадратичное отклонение подогрева теплоносителя в каналах, максимальной температуры оболочки твэлов, неравномерности температуры по периметру твэлов, соответственно.

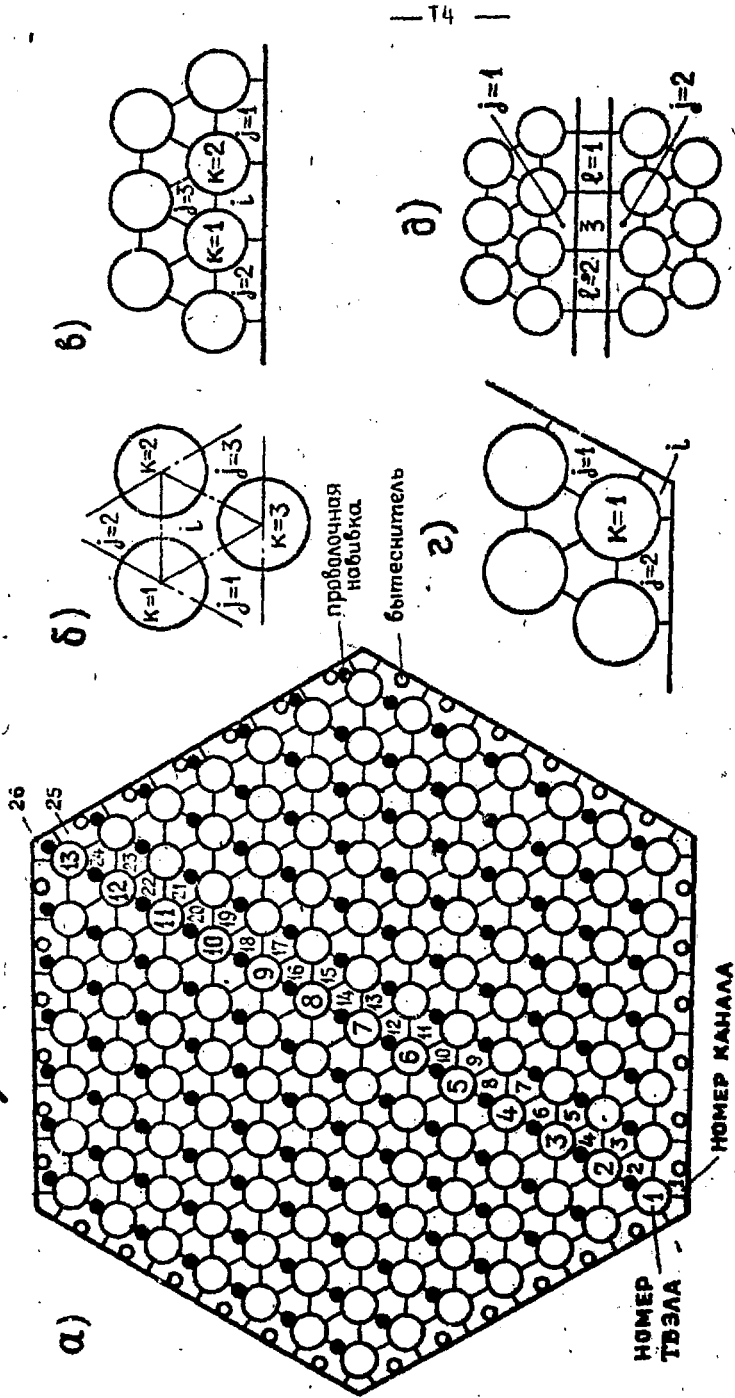


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения кассеты твэлов реактора типа БН-600 с разбиением кассеты на характерные каналы

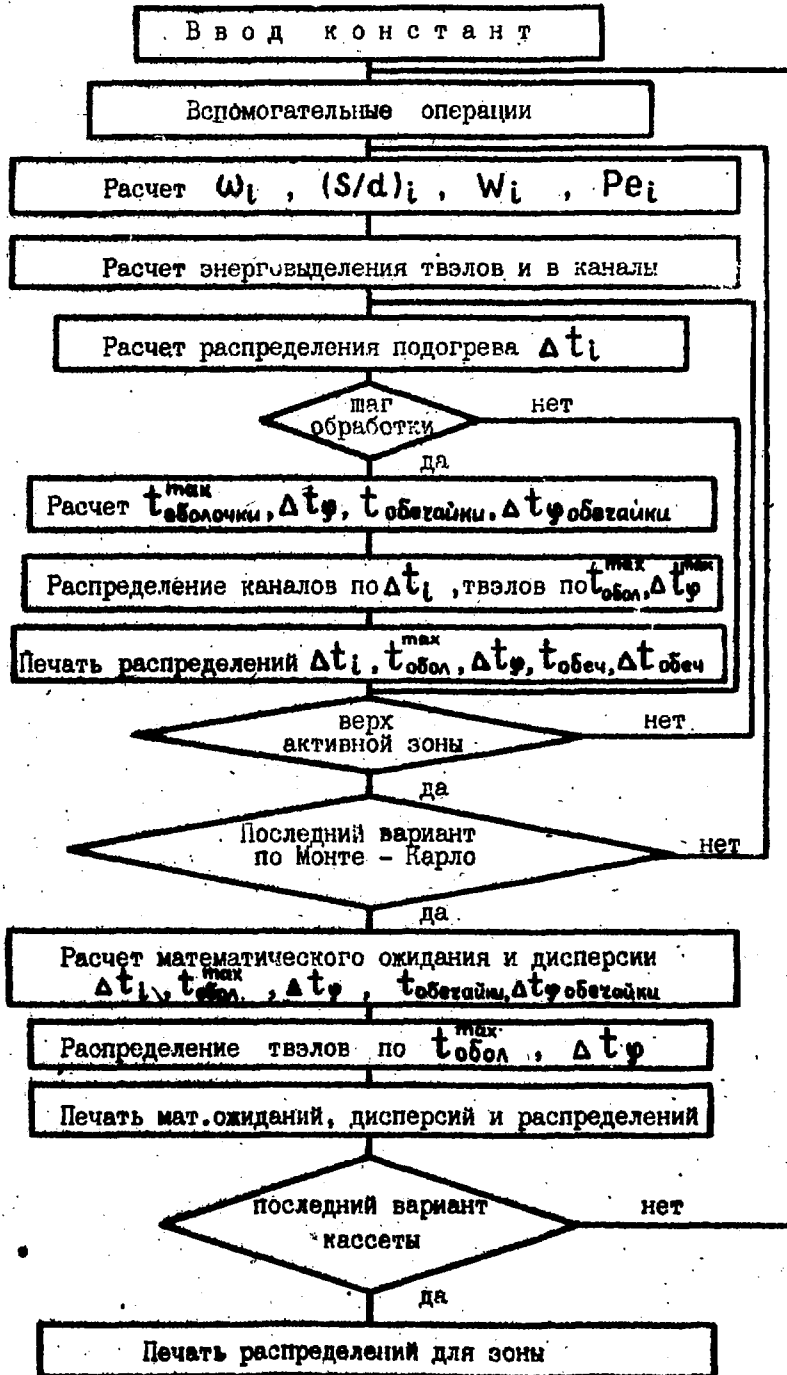


Рис. 2. Блок-схема программы TEMI-М теплогидравлического расчета кассет твэлов быстрых реакторов

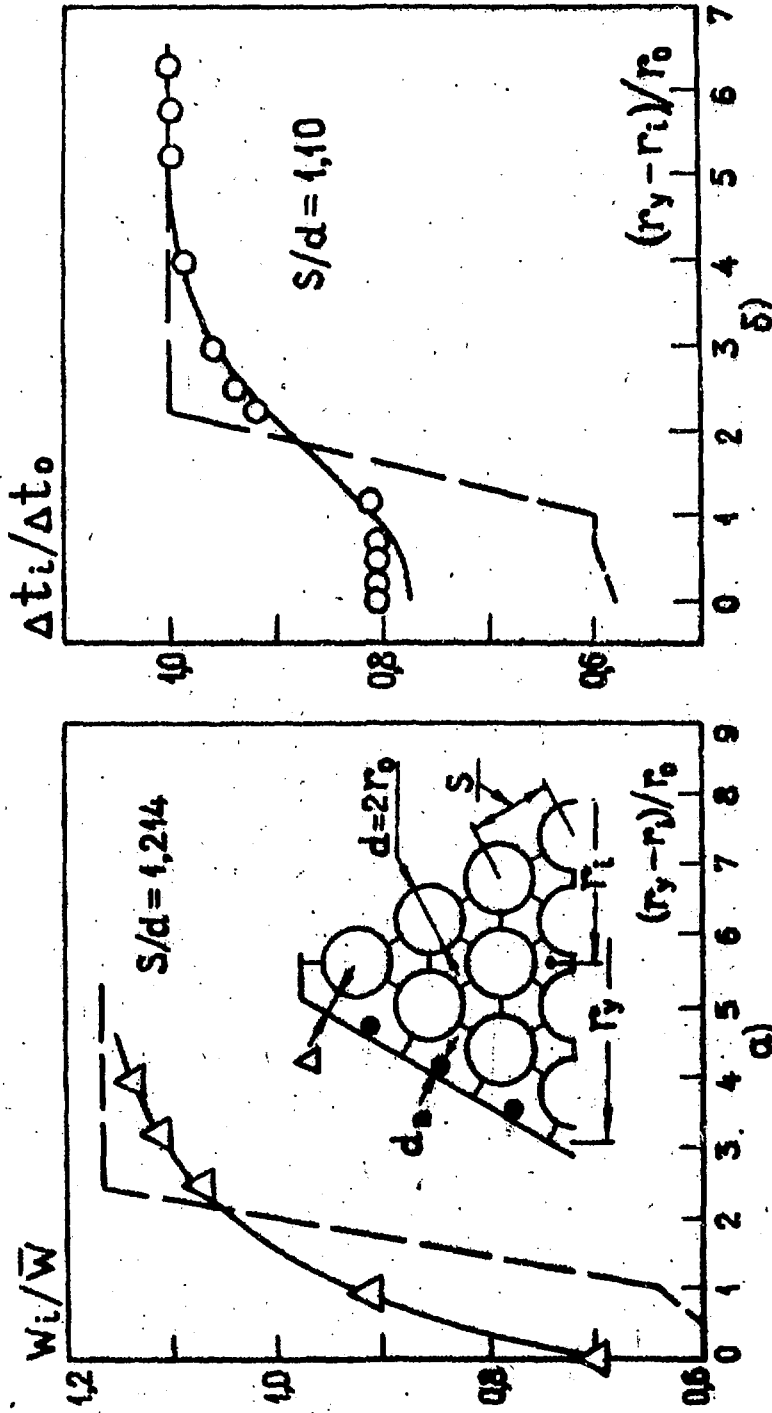


Рис. 3. Распределение скорости (а) и подгрева (б) теплоносителя по радиусу модельных сборок тэлов быстрых реакторов: Δ - экспериментальные данные, --- - расчет с учетом межканального обмена, - · - - - - расчет без учета межканального обмена

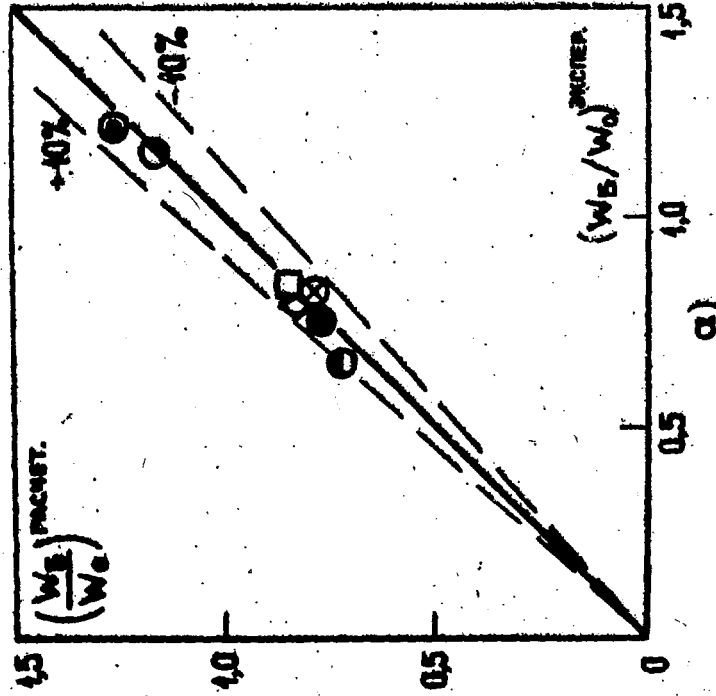
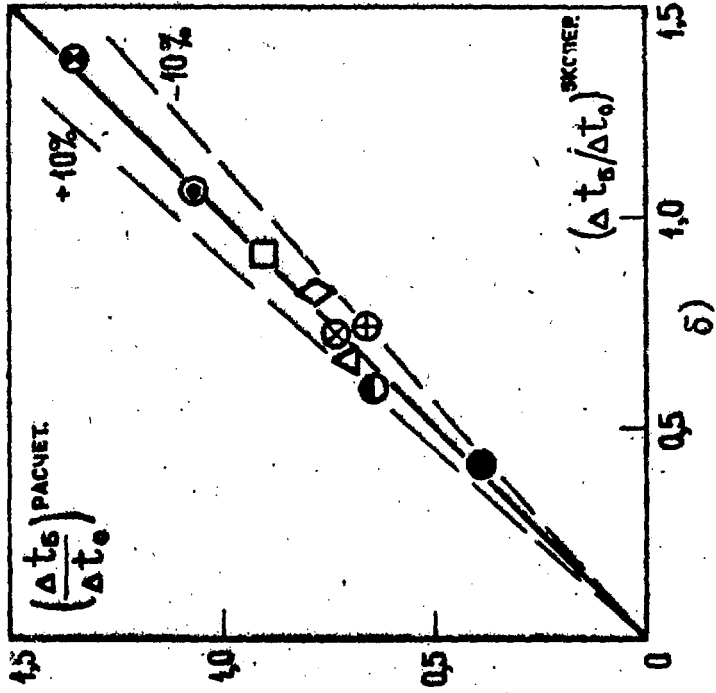


Рис. 4-а, б

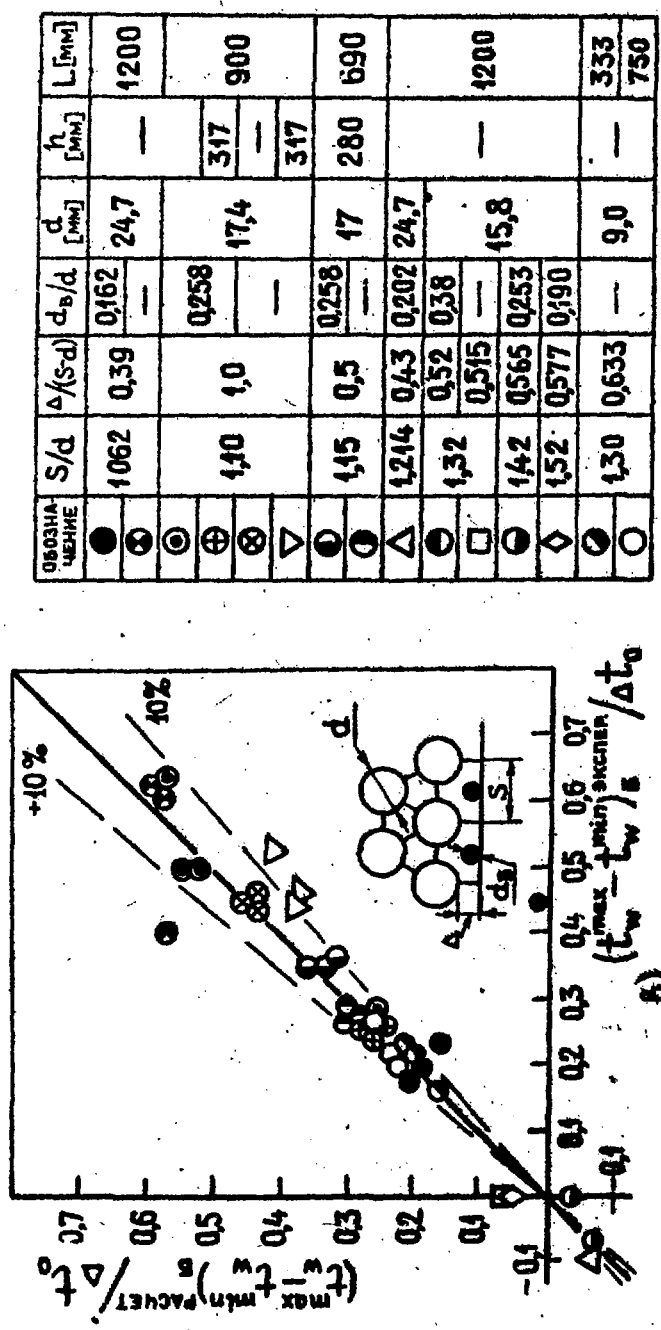


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений соотношения скоростей (а), подогревов (б) теплоносителя в периферийных и центральных каналах модельных сборок быстрых реакторов, а также неравномерности температуры по периметру периферийных газов в кассетах (в)

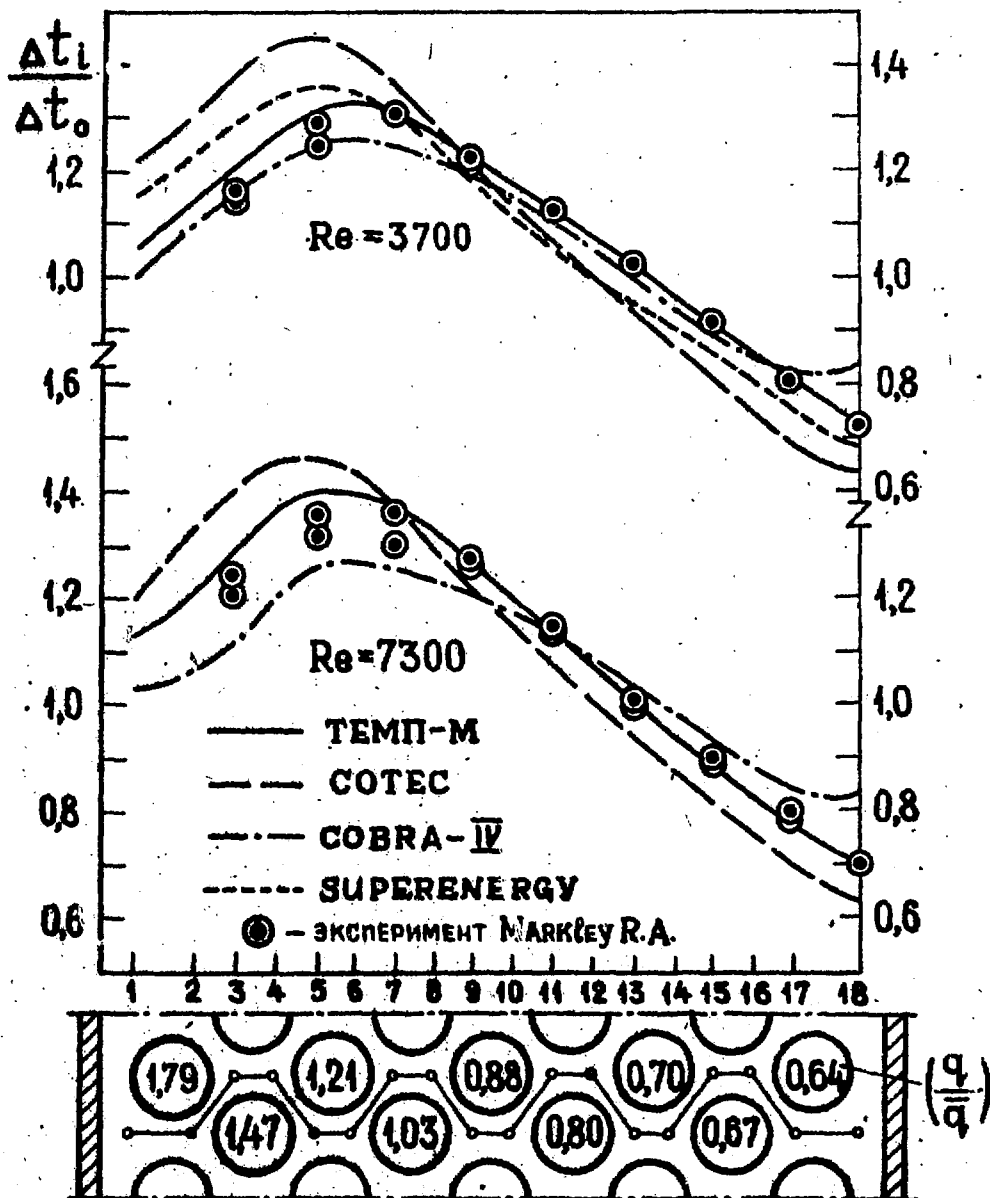


Рис. 5. Сравнение результатов расчетов безразмерного подогрева теплоносителя по программам TEMP-M (—), COTEC [14] (---), COBRA-IV [15] (-·-·-), SUPERENERGY [16] (·····) с данными экспериментальных исследований распределения подогрева теплоносителя по каналам модельной сборки твэлов (●) [13] при $Re = 3700$ и 7300 ; $S/d = 1,08$, $h = 100$ мм, $L = 1170$ мм

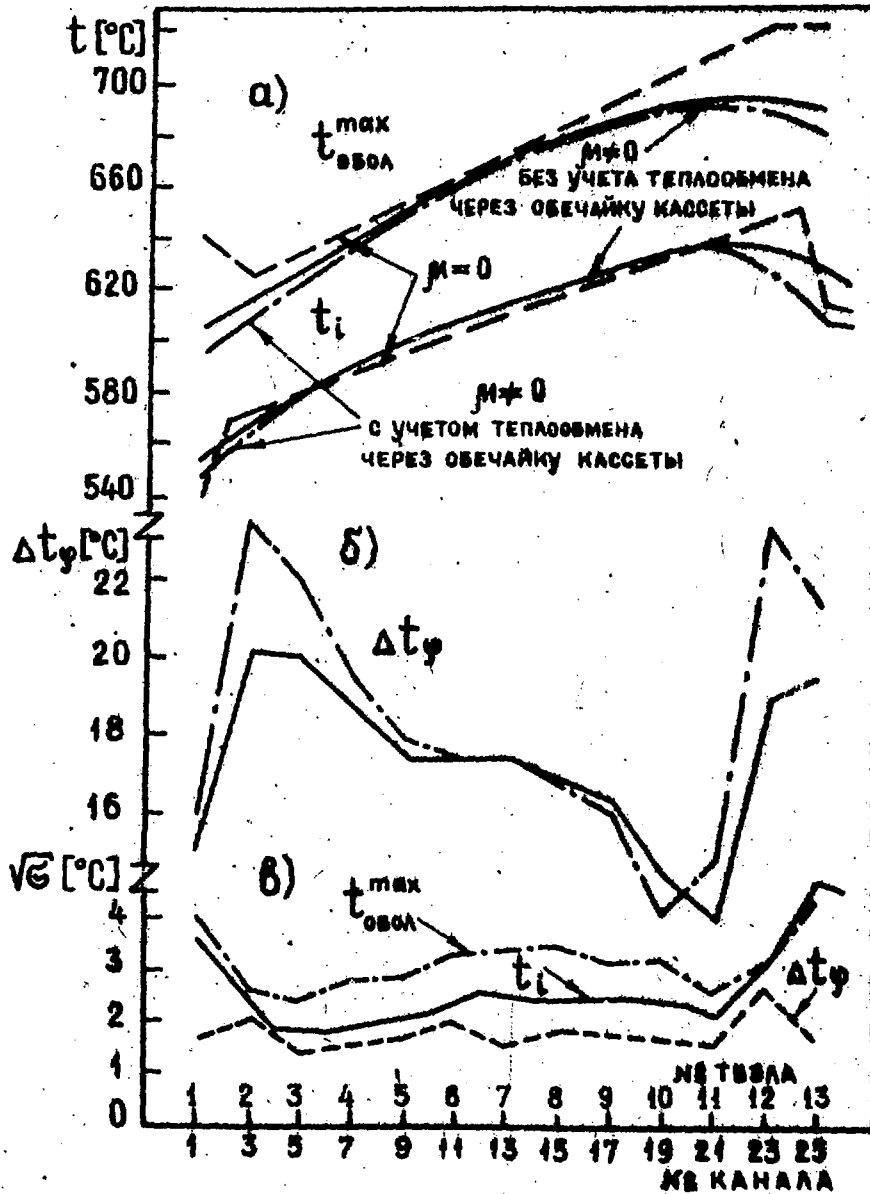


Рис. 6. Распределения максимальной температуры оболочек твэлов и подогрева теплоносителя (а), неравномерности температуры по периметру твэлов (б), их средних квадратичных отклонений (в) в кассете твэлов реактора типа БН-600 ($s/d = 1,17$; $h = 100$ мм, $L = 750$ мм) в случае неравномерного энерговыделения твэлов в поперечном сечении кассеты ($q_{\text{max}}/q = 1,2$)

Технический редактор Н. П. Герасимова.

Подписано к печати 22/II-1983 г. Т-06423 Формат 60×90 1/16

Офсетная печать Усл. п. л. 1.3 Уч.-изд. л. 0,9 Тираж 95 экз.

Цена 14 коп. ФЭИ-1401 Индекс 3624

Отпечатано на роталпринте ФЭИ, г. Обнинск

14 коп.

Индекс 3624

Программа ТЕМП-М теплогидравлического расчета кассет
ТВЭЛов быстрых реакторов.
ФЭИ-1401, 1983, 1-20.