

С 348Г
М-474

653/83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Мелихов В.В.
Б1-3-82-869.

Б1-3-82-869

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1982

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

В.В.Мелихов

Б1-3-82-869

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР И НАПРЯЖЕНИЙ В
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ РЕАКТОРА ИБР-2

Рукопись поступила

в издательский отдел

.. 16. 12. 82 г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

г. Дубна, 1982 г.

Введение

В работающем реакторе и при его аварийном расхолаживании после сброса защиты необходимо знать температурные условия, в которых находятся его конструктивные элементы, а также напряжения, возникающие в них при изменении температуры. Температуру некоторых элементов практически невозможно непосредственно измерить. Также трудно измерить подогрев натрия в активной зоне при расхолаживании реактора. В работе расчетным путем оцениваются температура и напряжения в подвижном отражателе, в корпусе реактора и трубе сливного коллектора, подогрев натрия при аварийной остановке реактора.

Температурное поле и напряжения в перемычке подвижного отражателя

Верхняя часть лопасти основного подвижного отражателя (конструкция ПО приведена в работе /1/) для улучшения теплоотвода разрезана на две половины (рис. 1). С целью уменьшения вибраций они соединены перемычкой; вследствие различия средних температур обеих частей в перемычке появляются напряжения сдвига. Геометрические размеры, обозначенные на рис. 1, следующие:

$\underline{H} = 0,5 \text{ м}$, $\underline{L} = 0,24 \text{ м}$, $\underline{h} = 0,03 \text{ м}$, $\underline{\ell} = 0,04 \text{ м}$, $\underline{\Delta_1} = 0,029 \text{ м}$,
 $\underline{\delta} = 0,011 \text{ м}$, $\underline{\Delta_2} = 0,031 \text{ м}$.

При расчете температурного поля предполагалось, что обе части ОПО между собой термически не связаны и в нижней торцевой плоскости отсутствует теплопередача.

Трехмерное уравнение теплопроводности

$$\underline{\lambda} \Delta \underline{T}(x, y, z) + \underline{q}_v(x, y, z) = 0$$

с граничными условиями третьего рода

$$-\lambda \nabla T = \alpha T,$$

на всех плоскостях, кроме нижней, для которой

$$\nabla T = 0,$$

решалось итерационным методом Гаусса-Зейделя.

Здесь $q_v(x, y, z)$ - объемное тепловыделение в стали отражателя, возникающее от радиационного излучения,

$\lambda = 30$ Вт/м·К - коэффициент теплопроводности стали,

$\alpha \approx 200$ Вт/м²·К - коэффициент теплоотдачи.

При численном решении предусматривались специальные меры, предотвращающие расходимость и дающие осциллирующую сходимость в узловых точках.

Значения температур (для скорости вращения отражателя 1500 об/мин и мощности реактора 1 МВт) на граничных плоскостях со стороны реактора приведены на рис. 2. Температура гелия, охлаждающего отражатель, принималась равной нулю. На диаграмме в скобках указаны экспериментальные значения тепловыделения в стали от γ -излучения реактора (на глубине 2,5 мм в I-й части отражателя), которые интерполировались для остальных узлов с помощью полиномов. Предполагалось, что по толщине отражателя, тепловыделение спадает по экспоненциальному закону

$$q_v(x, y, z) = q_v(0, y, z) \cdot e^{-\gamma x},$$

где $\gamma = 23$ м⁻¹ - постоянная спада.

Кроме тепловыделения от γ -излучения, в отражателе присутствует тепловыделение, обусловленное рассеянием нейтронов, а также трением при движении в гелиевой среде. По измерениям суммарного тепловыделения в центральной точке отражателя можно заключить, что вклад от нейтронного излучения не превышает 30%.

В табл. I приведены рассчитанные максимальные и средние температуры обеих частей основного подвижного отражателя для трех вариантов: I-й - принятый в настоящее время (см. рис. I,2), 2-й и 3-й варианты - с выравниванием средних температур. Также проведён оценочный расчет температуры подвижного отражателя гетерогенного типа (с лопастями в виде "трезубцев" и "вилки" /2/).

Таблица I

Максимальные и средние температуры основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей (приведены для мощности реактора I МВт)

	№ варианта	Δa_1 , мм	δ , мм	Δa_2 , мм	\bar{T}_1 , К	\bar{T}_2 , К	$T_{1, \max}$, К	$T_{2, \max}$, К	$\frac{W_1}{\text{кВт}}$	W_2 , кВт
		ОПО - лопасть	I	29	II	3I	26,5	16,5	41,0	25,0
	2	22	II	38	22,1	22,0	34,5	33,0	1,125	1,000
	3	23	5	43	22,4	22,4	35,0	34,0	1,175	1,050
ОПО - "трезубец", центральная часть	ширина, мм		толщина, мм		\bar{T} , К		T^{\max} , К		\underline{W} , кВт	
	72		48		20,5		29,5		0,500	
ДПО - "вилка", правая часть	72		72		14,0		20,5		0,400	

Напряжение, возникающие в перемычке и обеих частях ОПО (см. рис. I), можно получить в предположении, что перемычка испытывает чистый сдвиг, тогда

$$\underline{\tau} = \frac{\underline{G} \cdot \underline{\alpha} \cdot \underline{\Delta T}}{\frac{\underline{l}}{\underline{L}} \cdot \frac{\underline{h}(\underline{\Delta}_1 + \underline{\Delta}_2)}{2(1+\underline{\mu})\underline{\Delta}_1 \underline{\Delta}_2} + \frac{\underline{\delta}}{\underline{H}}},$$

$$\underline{\sigma}_{(2)}^{(1)} = -\frac{\underline{l}}{\underline{L}} \cdot \frac{\underline{h} \cdot \underline{\tau}}{\underline{\Delta}_1}, \quad \underline{\sigma}_{(2)}^{(2)} = \frac{\underline{l}}{\underline{L}} \cdot \frac{\underline{h}}{\underline{\Delta}_2} \cdot \underline{\tau},$$

где $\underline{G} = \frac{\underline{E}}{2(1+\underline{\mu})}$ - модуль сдвига, $\underline{\Delta T} = \underline{T}_1 - \underline{T}_2$.

Подставляя численные значения ($\underline{\alpha} = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/К, $\underline{E} = 2,1 \cdot 10^4$ кг/мм², $\underline{\mu} = 0,3$), получим для напряжений в первом варианте ОПО-лопасть при мощности реактора 1 МВт:

$$\begin{aligned} \underline{\tau} &= 0,94 \cdot \underline{\Delta T} \quad \approx 9,4 \text{ (кг/мм}^2\text{)}, \\ \underline{\sigma}_{(2)}^{(1)} &= -0,12 \cdot \underline{\Delta T} \quad \approx -1,2 \text{ (кг/мм}^2\text{)}, \\ \underline{\sigma}_{(2)}^{(2)} &= 0,10 \cdot \underline{\Delta T} \quad \approx 1,0 \text{ (кг/мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

В дальнейшем все значения температур и напряжений приводятся для мощности реактора 1 МВт.

Термомеханический расчет корпуса реактора и коллектора при аварийном расхолаживании

Первый контур реактора ИБР-2 состоит из двух петель, и в каждой петле установлен электромагнитный насос. Проектный суммарный расход натрия через реактор составляет $\underline{V}_H = 135$ м³/час. При срабатывании аварийной защиты расхолаживание реактора осуществляется выключением одного из насосов и переключением другого (на время ~2 мин) на пониженный расход (штатный вариант расхолаживания). При этом экспериментальное значение расхода натрия через активную зону реактора составляет $\underline{V}_* = 9-10$ м³/час.

С целью сравнения нескольких возможных вариантов расхолаживания был проведен расчет подогрева натрия, температур и напряжений в корпусе и трубе сливного коллектора как для штатного

варианта, так и для трех других: 1 - после сброса защиты вводится 4-5 с задержка на отключение насосов, далее как в штатном варианте; 2 - на пониженный расход переключаются оба насоса, в этом случае $\underline{V_*} = 28 \text{ м}^3/\text{час}$; 3 - расход натрия остается неизменным.

Расчет основан на следующих экспериментальных данных:

1. Измерения кривых спада расхода во времени при нескольких начальных значениях расхода (рис. 3, показано для двух значений - $\underline{V_0} = 40$ и $100 \text{ м}^3/\text{час}$). Экспериментальные точки были обработаны методом наименьших квадратов и для расчетов использовалась такая зависимость спада расхода от времени и начального расхода

$$\underline{V(t)} = \underline{V_*} + (\underline{V_0} - \underline{V_*}) \cdot \exp\left\{-\left[1,58 \frac{\underline{V_*}}{\underline{V_H}} + \left(1 - \frac{\underline{V_*}}{\underline{V_H}}\right) \underline{\lambda}\right](t - t_3)\right\} \times \left\{1 - \frac{\underline{\lambda}}{\underline{\omega}} \sin[\underline{\omega}(t - t_3)] \cdot \exp\left[\frac{\underline{\lambda}}{2}(t - t_3)\right]\right\},$$

где $\underline{\omega} = 1$ радиан/с, $\underline{\lambda} = 0,1 + 0,34 \frac{\underline{V_0}}{\underline{V_H}}$, с^{-1} .

2. Измерения тепловых потерь на участке между входной и выходной термопарой, мощность которых составила $\underline{W}_{\text{пот}} = -9,5 \text{ кВт}$. На рис. 4 сплошной линией приведена кривая $\underline{\Delta T} = \frac{\underline{W}_{\text{пот}}}{C_M \cdot \underline{V}}$, построенная методом наименьших квадратов, по экспериментально полученной разности температур $\underline{\Delta T}(\text{К})$ в зависимости от расхода натрия - \underline{V} .

3. Измерения температуры внешней поверхности корпуса в области смещения натрия на выходе из активной зоны (рис. 5) после нескольких запланированных сбросов мощности (с 1 МВт) для изучения развития естественной конвекции в контуре. Измерения проводились для работы насоса на пониженном расходе в течение

1 мин (чёрные квадратики) и 2 мин (белые). Сплошные линии на рисунке - результаты расчета.

Расчет проводился по схеме, показанной на рис. 6. Здесь расчетная зона разбита на пять участков: 1 - активная часть одной из самых энергонапряженных кассет (доля энерговыделения в ней от средней мощности реактора - $\underline{W}_1(t)$ составляет $\underline{\delta}_1 = 0,016; /2/$), 2 - газовая полость твэлов в кассете, 3 - область смешения натрия, вытекающего из всех кассет реактора, число которых - $\underline{N} = 78$; 4 - теплообмен натрия с поворотной пробкой и корпусом реактора (учитываются тепловые потери от корпуса в окружающую среду, $\underline{W}_4 = \underline{\delta}_4 \cdot \underline{W}_{\text{ПОТ}}$); 5 - теплообмен натрия с трубой сливного коллектора (учитываются потери $\underline{W}_5 = \underline{\delta}_5 \cdot \underline{W}_{\text{ПОТ}}$). Участки № 1 и № 4 разбивались на несколько слоев. Далее предполагалось, что остаточное тепловыделение в реакторе за счет $\underline{\beta}, \underline{\gamma}$

-распадов осколков деления изменяется во времени по следующему закону /3/:

$$\underline{W}_1(t) = 0,07 \cdot \underline{W}_0 \cdot [t^{-0,2} - (t_p + t)^{-0,2}],$$

где $1 \leq t < 10^7$ - время, прошедшее после остановки реактора, с; t_p - длительность работы реактора на мощности \underline{W}_0 , с.

Систему уравнений для расчета температур можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{Q}_1^m(t)}{dt} &= -\underline{\gamma}_1^i (\bar{Q}_1^m - \bar{T}^m) + \frac{\underline{\delta}_1 Q_1^m \cdot \underline{W}_1(t)}{C_{i1}}, \\ \frac{d\bar{Q}_2^m(t)}{dt} &= -\underline{\gamma}_2^i (\bar{Q}_2^m - \bar{T}^m), \\ \frac{d\bar{T}^m(t)}{dt} &= \underline{\beta}_1^i (\bar{Q}_1^m - \bar{T}^m) + \underline{\beta}_2^i (\bar{Q}_2^m - \bar{T}^m) - 2 \cdot \underline{M}_i \frac{V(t)}{C_i} (\bar{T}^m - T^m), \\ \bar{T}^{m+1}(t) &= 2 \cdot \bar{T}^m - T^m, \\ \bar{T}^1(t) &= 0, \end{aligned} \quad (I)$$

для $m = 1, 2, \dots, \sum M_i$ и участков $i = 1, 2, 4, 5$.

В области смешения входная температура натрия для 4-го участка переопределяется по формуле:

$$T^{m_{i+2}} = T^{m_i} + \frac{T^{m_{i+2}} - T^{m_i}}{\delta_i \cdot N}$$

В системе (I) приняты обозначения: \bar{T}^m - средняя температура натрия, T^{m_i} и $T^{m_{i+1}}$ - температура натрия на входе и выходе из слоя; $\bar{\theta}_1^m$ и $\bar{\theta}_2^m$ - средние температуры конструктивных элементов реактора; C_{i2} - их теплоемкость; V_{i2} - объем натрия для данного участка. Остальные коэффициенты приведены в табл. 2. Распределение тепловыделения ($Q_i^m = q_{fv}^m / \bar{q}_{fv}$) по высоте активной части кассеты дано в табл. 3 /4/. Система решалась методом Рунге-Кутты 5-го порядка /5/.

Таблица 2

Коэффициенты для системы уравнений теплообмена (I)

i	γ_{11}^i, c^{-1}	γ_{21}^i, c^{-1}	β_{11}^i, c^{-1}	β_{21}^i, c^{-1}	δ_i	Q_i^m	$C_{i2}, \frac{kJ}{K}$	M_i	$V_{i2}, 10^{-3} M^3$
1	0,126	0	1,4	0	0,016	табл.3	0,74	12	4,6
2	0,1	0	0,6	0	0	0	-	1	5,0
4	0,0363	0,0042	0,135	0,0333	0,25	1	104	5	26,0
5	0,045	0	0,045	0	0,075	1	13	1	11,0

Таблица 3

Распределение тепловыделения по высоте активной части кассеты

m	1	2	3	4	5	6	7
Q_i^m	0,561	0,826	1,032	1,171	1,259	1,298	1,294
m	8	9	10	11	12		
Q_i^m	1,227	1,096	0,929	0,751	0,557		

Температурные напряжения, возникающие в корпусе реактора и трубе коллектора, рассчитывались в предположении, что корпус и труба находятся в плоскодеформированном состоянии и могут свободно расширяться в осевом направлении (пластические деформации не учитываются).

Используя уравнения и формулы, приведенные в работе /6/, можно получить следующие зависимости для радиальных (σ_r), тангенциальных (σ_θ) и осевых (σ_z) напряжений:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{2(1-\mu)} \cdot \frac{1}{r^2} \left[(r^2 - R_1^2) \cdot \bar{\theta} - 2 \int_{R_1}^r \theta(r,t) r dr \right] - \frac{R_2^2 - r^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} P,$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left\{ \frac{1}{2r^2} \left[(r^2 - R_1^2) \cdot \bar{\theta} - 2 \int_{R_1}^r \theta(r,t) r dr \right] - (\bar{\theta} - \theta) \right\} + \frac{R_2^2 + r^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} P,$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\mu} (\bar{\theta} - \theta) + \frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} P,$$

где $\bar{\theta} = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \theta(r,t) r dr$ - средняя температура в стенке; P - внутреннее давление; R_1 и R_2 - внутренний и внешний радиусы корпуса или трубы коллектора; $\alpha = 1,75 \cdot 10^{-5}$ 1/К, $\mu = 0,3$, $E = 2 \cdot 10^4$ кг/мм² - коэффициент температурного расширения, коэффициент Пуассона и модуль упругости.

Как видно из этих уравнений необходимо знание распределения температуры по толщине (Δ) стенки. Для этого в выбранной точке решалось нестационарное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах для стенки корпуса или трубы. В разностной форме его можно записать как систему уравнений следующего вида:

$$\frac{d\theta^{k+1}(t)}{dt} = \frac{\lambda}{c_v} \left(\frac{k}{\Delta} \right)^2 \cdot \left[a_{k+1} (\theta^{k+2} - \theta^{k+1}) + b_{k+1} (\theta^k - \theta^{k+1}) \right] \quad (2),$$

для $k = 1, 2, \dots, K$, где K - число интервалов, на которые разбита стенка. На граничных поверхностях:

$$\underline{\theta}^1(t) = \frac{\underline{\theta}^2(t) + \frac{\alpha \Delta}{2\lambda K} \bar{T}(t)}{1 + \frac{\alpha \Delta}{2\lambda K}}, \quad \text{внутри } (r=R_1),$$

$$\underline{\theta}^{K+2}(t) = \underline{\theta}^{K+1}(t) + \frac{\Delta}{2\lambda K} q_{\text{ст}}, \quad \text{снаружи } (r=R_2).$$

Здесь α и λ - коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности, $q_{\text{ст}}$ - плотность тепловых потерь, $\bar{T}(t)$ - средняя температура натрия, рассчитанная из предыдущей системы (I), a_{k+1} и b_{k+1} - геометрические коэффициенты.

Результаты расчёта температур и напряжений для четырех схем расхолаживания, описанных выше, приведены на рис. 7-9.

В заключение отметим, что для мощности реактора I МВт:

1. Максимальная температура подвижного отражателя относительно гелия не превышает - 41К. Напряжения сдвига в перемычке, соединяющей две части основного подвижного отражателя - 9,4 кг/мм².

2. Максимальный подогрев натрия на выходе из активной части кассеты при штатном варианте расхолаживания - 107К, в области смешения - 62,5К. Для варианта с 4-5 с задержкой подогрев натрия в области смешения не превышает - 45К. Максимальные напряжения на внутренней поверхности корпуса реактора для штатного варианта - 4,1 кг/мм², для варианта с 4-5 с задержкой - 2 кг/мм².

Таким образом, вариант с задержкой отключения циркуляции на 4-5 с является лучшим из рассмотренных. В этом варианте подогрев натрия в ~1,5 раза, а напряжения в ~2 раза меньше, чем в штатном варианте расхолаживания.

Литература

1. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, № 5, с. 17.
2. В.Гудовский и др. ОИЯИ, Р13-12483, Дубна, 1979.
3. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах (под ред. Ю.Е.Багдасарова). Атомиздат, М., 1969.
4. Бабаев А.И. и др. ОИЯИ, Р3-12051, Дубна, 1979.
5. Дж.Форсайт, М.Малькольм, К.Моулер. Машинные методы математических вычислений. "Мир", М., 1980.
6. Ломидзе В.Л., Мелихов В.В. ОИЯИ, 3-11550, Дубна, 1978.

Подписи к рисункам

- Рис. 1. Верхняя часть лопасти основного подвижного отражателя.
- Рис. 2. Температура поверхности (К) со стороны реактора первой части (верхняя цифра) и второй (нижняя) основного подвижного отражателя. В скобках указано тепловыделение от γ -излучения реактора (Вт/г·МВт).
- Рис. 3. Спад расхода натрия при переключении насосов:
1 - $V_0 = 40$ м³/час, 2 - $V_0 = 100$ м³/час.
Время (t) в с.
- Рис. 4. Разность показаний ΔT (К) между выходной и входной в активную зону термопарами в зависимости от расхода натрия V (м³/час).
- Рис. 5. Изменения температуры корпуса реактора
 $\Delta T = T(t) - T(0)$, К во времени (t , мин)
при работе насоса на пониженном расходе в течение 1 мин (верхняя кривая) и 2 мин (нижняя кривая).
■ и □ - экспериментальные точки.
- Рис. 6. Схема для расчета температур при аварийном расхолаживании реактора.
- Рис. 7. Подогрев натрия (К) при штатном варианте расхолаживания реактора: 1 - на выходе из активной части кассеты, 2 - в области смешения, 3 - на входе в трубу коллектора; 4 - изменение температуры на внешней поверхности корпуса. Время (t), с.
- Рис. 8. Напряжения (σ_{θ} , кг/мм²) на внутренней (кривые 1,3) и внешней (2,4) поверхностях корпуса реактора и трубы сливного коллектора. Время (t), с.
- Рис. 9. Подогрев натрия (К) в области смешения (а), температура (К) внешней поверхности корпуса (б) и напряжения (σ_{θ} , кг/мм²) на внутренней поверхности корпуса (в) для различных вариантов расхолаживания реактора: 1 - с 4+5с задержкой, 2 - переключением двух насосов на пониженный расход, 3 - расход натрия не изменяется. Время (t), с.
- (неопределённость времени задержки учитывается толщиной линии)

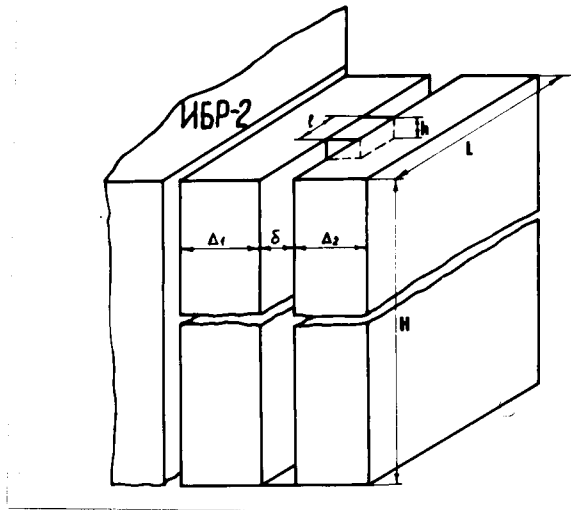


Рис. 1.

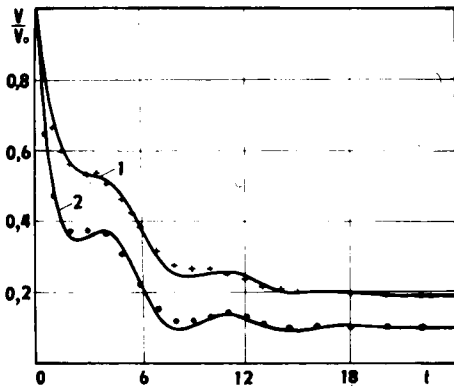


Рис. 3.

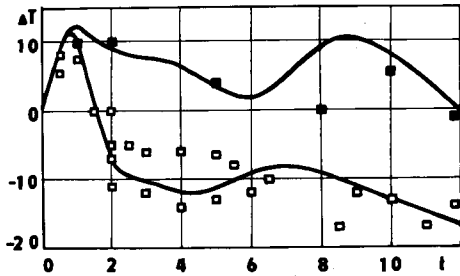


Рис. 5.

15,6 9,6 (0,024)	18,6 11,4	20,2 12,4	20,8 12,7 (0,041)	20,3 12,4	18,8 14,6	15,8 9,8 (0,019)
20,9 12,8	24,7 15,1	26,7 16,3	27,6 16,8	27,2 16,6	25,7 15,6	22,2 13,5
24,2 15,2 (0,056)	29,4 17,9	31,8 19,3	32,8 19,9 (0,065)	32,4 19,6	30,7 18,6	26,6 16,1 (0,067)
28,3 17,2	33,6 20,4	36,2 21,9	37,2 22,5	36,6 22,1	34,3 20,7	29,4 17,8
31,0 18,8	36,5 22,0	39,1 23,6	39,8 24,0	38,8 23,4	35,8 21,6	30,2 18,3
32,2 19,5 (0,077)	37,5 22,6	39,8 23,9	40,0 24,1 (0,107)	38,3 23,2	35,0 21,2	28,9 17,6 (0,063)
31,9 19,2	36,3 21,9	37,8 22,8	37,6 22,6	35,4 21,4	31,8 19,4	25,9 15,8
29,8 18,0 (0,074)	33,0 20,0	33,6 20,4	32,7 19,9 (0,067)	30,4 18,6	27,1 16,6	21,9 13,5 (0,034)
26,2 15,8	28,4 17,2	28,2 17,3	27,0 16,6	24,8 15,3	21,8 13,6	17,6 11,0
21,8 13,3	23,2 14,3	22,8 14,1	21,6 13,4	19,6 12,3	17,2 10,9	13,9 8,9
16,8 10,5 (0,026)	18,1 11,4	17,8 11,3	16,9 10,8	15,4 9,9	13,5 8,7	10,8 7,1 (0,012)

Рис. 2.

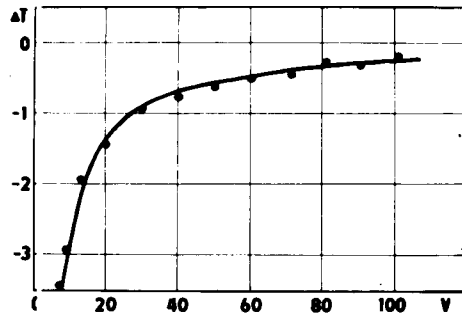


Рис. 4

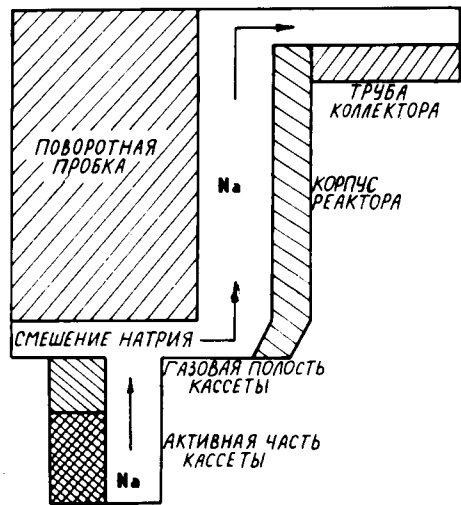
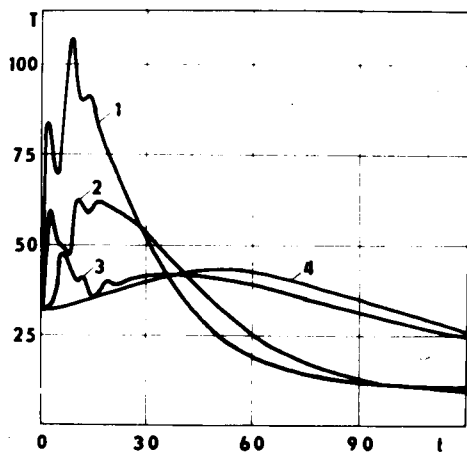
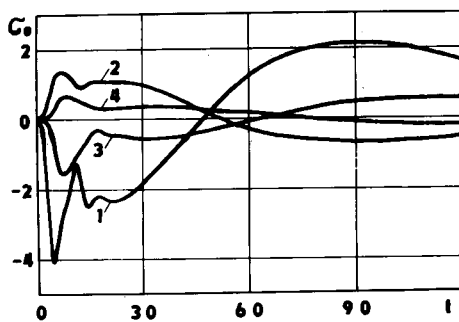


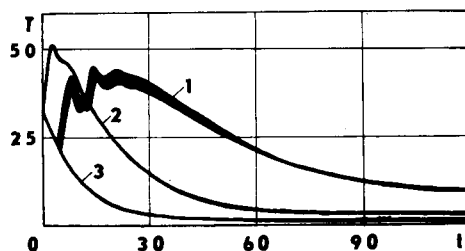
Рис. 6.



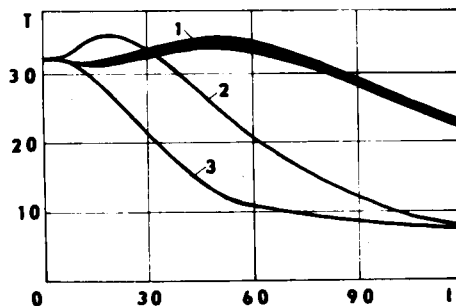
Puc. 7.



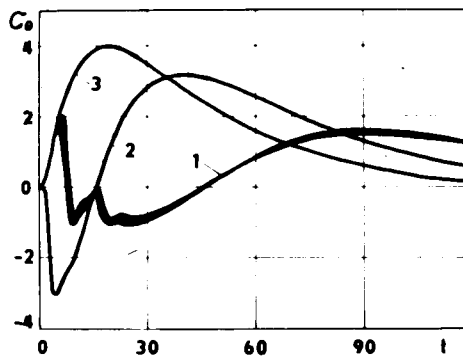
Puc. 8.



Puc. 9 (a)



Puc. 9 (b)



Puc. 9 (b)