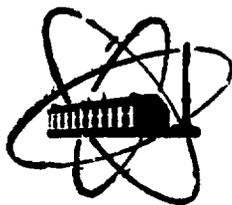


506006300



ФЭИ-972



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

*Ю. В. ИЛЬИН, Т. Ю. КАЗАКОВА, Л. М. ПАРАФИЛО,
С. И. ЩЕРБАКОВ*

**Расчет термонапряженного состояния
корпусов барабанов-сепараторов
в переходных режимах**

Обнинск — 1979

ФЭИ-972

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**Ю.В.Ильин, Т.Ю.Казакова, Л.М.Парафимо,
С.И.Щербаков**

**РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСОВ
БАРАБАНОВ-СЕПАРАТОРОВ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ**

Обнинск-1979

УДК 621.039.536.2

М - 17

А Н Н О Т А Ц И Я

Температурный режим и напряженное состояние корпуса барабана-сепаратора в переходном процессе с изменяющимся давлением и уровнем воды исследуются расчетным путем в $(\chi - \varphi)$ геометрии.

Расчет температурных полей выполняется с помощью метода переменных направлений.

Напряжения и деформации рассчитываются методом конечных элементов.

1. Корпуса барабанов-сепараторов АЗО, представляющие собой горизонтально расположенные толстостенные цилиндры, в наиболее распространенной технологии изготавливают из двухслойного стального листа: основной слой, несущий давление, и плакирующий из аустенитной стали. Снаружи корпус окружен слоем теплоизоляции. В рабочих условиях корпус заполнен до определенного уровня водой, а выше уровня - водяным паром, обе фазы находятся в термодинамическом равновесии. В переходных и аварийных режимах давление внутри корпуса и уровень воды могут изменяться с различной скоростью. Из-за различия условий охлаждения верхней, омываемой паром, и нижней, омываемой водой, частей корпуса его температурное поле становится неравномерным и могут возникать значительные термические напряжения. Выявление качественных особенностей протекающих явлений и определение допустимых процессов обеспечивается описываемым ниже методическим подходом.

2. Исходным уравнением является уравнение теплопроводности

$$C(\vec{x}) \frac{\partial T(\vec{x}, \tau)}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda(\vec{x}) \operatorname{grad}(T(\vec{x}, \tau))) \quad (1)$$

где τ - время,
 $T(\vec{x}, \tau)$ - температура в сечении барабана-сепаратора,
 $C(\vec{x})$ - объемная теплоемкость,
 $\lambda(\vec{x})$ - коэффициент теплопроводности,
 \vec{x} - координата положения точки в расчетной области,

с граничными условиями

$$\frac{\partial T}{\partial \nu} = 0$$

для $\nu = 0, \infty$;

$$\lambda_k \left(\frac{\partial T}{\partial \nu} \right)_k = \alpha \sigma (T - T_0)$$

на внутренней границе корпуса,

$$-\lambda_{из} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_2 = \alpha_N (T_2 - T_N) \quad \text{на наружной границе изоляции,}$$

где $\alpha_в$ - коэффициент теплоотдачи на внутренней границе корпуса,

$T_в$ - температура водяной среды,

$\lambda_k, \lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности корпуса и изоляции соответственно,

T_N, α_N - температура воздуха и коэффициент теплоотдачи к нему,

на границах раздела слоев используются условия равенства тепловых потоков и температур.

Для решения задачи был использован метод переменных направлений [1]. Расчетная область заменялась сеточной:

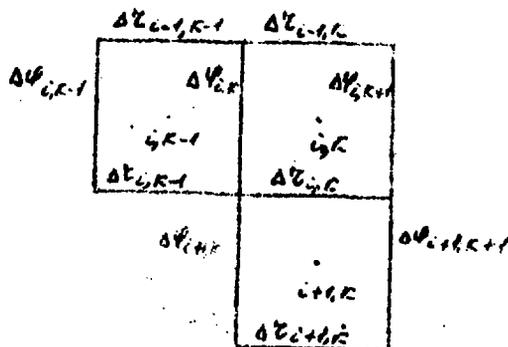
$$\omega_{\Delta r, \Delta \varphi, \Delta z} = \left\{ \left(r_k = R_i + \sum_{l=1}^{k-1} \Delta r_l + \frac{\Delta r_k}{2}, \quad \varphi_i = (i - \frac{1}{2}) \Delta \varphi, \quad z_j = j \cdot \Delta z \right), \right. \\ \left. k = 1, 2, \dots, M; \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 0, \frac{1}{2}, \dots, \pi \right\} \quad (2)$$

где M, N - число участков разбиения расчетной области по направлениям ортогональных осей координат.

R_i - внутренний радиус корпуса.

Шаги $\Delta r, \Delta \varphi$ выбраны таким образом, чтобы границы элементов конструкции совпадали с границами расчетных ячеек.

Сеточные функции $T_{ik}, C_{ik}, \lambda_{ik}$ определены в центрах расчетных ячеек согласно приведенной ниже схеме, а размеры ячеек $\Delta r_{ik}, \Delta \varphi_{ik}$ - по контуру ячеек в направлениях осей координат.



Уравнение теплопроводности (I) в сеточных функциях может быть записано в виде

$$C_{i,k} \frac{\Delta T}{\Delta \tau} - \frac{1}{S_{i,k}} \left\{ (T_{i,k+1} - T_{i,k}) \left(\frac{\lambda}{\delta z} \right)_{i,k+1} \Delta \varphi_{i,k+1} - (T_{i,k} - T_{i,k-1}) \left(\frac{\lambda}{\delta z} \right)_{i,k} \Delta \varphi_{i,k} + (T_{i+k,k} - T_{i,k}) \left(\frac{\lambda}{\delta y} \right)_{i+k,k} \Delta z_{i+k,k} - (T_{i,k} - T_{i-1,k}) \left(\frac{\lambda}{\delta y} \right)_{i-1,k} \Delta z_{i-1,k} \right\} = 0, \quad (3)$$

где $\left(\frac{\lambda}{\delta \varphi} \right)_{i,k} = 4 / \left(\frac{\Delta \varphi_{i,k} + \Delta \varphi_{i,k+1}}{\lambda_{i,k}} + \frac{\Delta \varphi_{i-1,k} + \Delta \varphi_{i,k}}{\lambda_{i-1,k}} \right),$

$$\left(\frac{\lambda}{\delta z} \right)_{i,k} = 4 / \left(\frac{\Delta z_{i,k} + \Delta z_{i+k,k}}{\lambda_{i,k}} + \frac{\Delta z_{i-1,k} + \Delta z_{i,k}}{\lambda_{i-1,k}} \right),$$

при этом для граничных ячеек (i, N) , охлаждаемых водой или паром

$$\left(\frac{\lambda}{\delta z} \right)_{i,N} = 4 / \left(\frac{\Delta z_{i,N} + \Delta z_{i+1,N}}{\lambda_{i,N}} + \frac{4}{d_0} \right),$$

а для ячеек охлаждаемых воздухом

$$\left(\frac{\lambda}{\delta z} \right)_{i,N} = 4 / \left(\frac{\Delta z_{i,N} + \Delta z_{i+1,N}}{\lambda_{i,N}} + \frac{4}{d_N} \right).$$

Согласно методу переменных направлений система (3) заменяется двумя системами уравнений, решаемых поочередно

$$\begin{aligned} (2 \frac{C_{i,k}}{\Delta \tau} + k_{i,k}^z + k_{i,k+1}^z) T_{i,k}^{j+1/2} - k_{i,k+1}^z T_{i,k+1}^{j+1/2} - k_{i,k}^z T_{i,k-1}^{j+1/2} = \\ (2 \frac{C_{i,k}}{\Delta \tau} - k_{i+k,k}^y - k_{i-1,k}^y) T_{i,k}^j + k_{i+k,k}^y T_{i+k,k}^j + k_{i-1,k}^y T_{i-1,k}^j; \end{aligned} \quad (4)$$

$$(2 \frac{C_{i,k}}{\Delta \tau} + k_{i,k}^y + k_{i+k,k}^y) T_{i,k}^{j+1} - k_{i+k,k}^y T_{i+k,k}^{j+1} - k_{i,k}^y T_{i-1,k}^{j+1} = \quad (5)$$

$$(2 \frac{C_{i,k}}{\Delta \tau} - k_{i,k+1}^z - k_{i-1,k}^z) T_{i,k}^{j+1/2} + k_{i,k+1}^z T_{i,k+1}^{j+1/2} + k_{i-1,k}^z T_{i-1,k}^{j+1/2};$$

где

$$K_{i,k}^z = \left(\frac{\lambda}{\delta \chi} \right)_{i,k} \cdot \frac{\Delta \varphi_{i,k}}{S_{i,k}} ;$$

$$K_{i,k}^\varphi = \left(\frac{\lambda}{\delta \varphi} \right)_{i,k} \cdot \frac{\Delta z_{i,k}}{S_{i,k}} ;$$
(6)

$S_{i,k}$ - площадь расчетной ячейки (i, k) .

Переход от временного шага j к шагу $j+1$ осуществляется в 2 этапа с шагами $\frac{\Delta t}{2}$: решаются уравнения (4) неявные по направлению z , и явные по направлению φ , а затем уравнения (5) явные по z и неявные по φ . Для решения каждой из этих систем подсистемы одновременных уравнений по невному направлению решаются методом прогонки [1], который требует задания коэффициентов прогонки γ и β на границах области

$$T_{\text{внешн}} = \gamma \cdot T_{\text{внутр}} + \beta ,$$

где $\gamma = 1, \beta = 0$ - при адиабатной границе,
 $\gamma = 0, \beta = T_s$ - при теплоотдаче в окружающую среду с постоянной температурой среды.

3. Напряженное состояние корпуса определяется для ряда фиксированных моментов времени t_i при известном распределении температур $T(t_i, r, \varphi)$ и внутреннем давлении $P(t_i)$.

в с. (3)

Решается обобщенная плоскодеформированная задача, т.е. осевая деформация ϵ_z принимается постоянной по сечению. Для решения задачи использовалось уравнение Лагранжа [2], выражающее принцип минимума потенциальной энергии деформации и эквивалентное уравнениям равновесия и граничным условиям в напряжениях

$$\delta J = \delta \left\{ \int_0^{t_i} \left(\frac{1}{2} \kappa \epsilon_0^2 + \frac{1}{2} (1 + \nu) \sigma^2 \right) \int_0^{e_i} \epsilon_i \, d\epsilon_i - 3 \kappa \epsilon_0 \epsilon_T \right\} dS - \int_{e'} (P_r u + P_\theta v) d\epsilon = 0 ,$$

- где \mathcal{E} - потенциальная энергия деформации,
 S - площадь поперечного сечения корпуса,
 e' - часть граничного контура, на которой заданы нагрузки,
 κ - объемный модуль упругости,
 u, v - перемещения в радиальном и окружном направлениях,
 $\epsilon_0 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi}{3}$ - средняя деформация,
 $\epsilon_r = \int_{T_0}^T \alpha_r dT$ - температурная деформация,
 $\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_\varphi)^2 + (\epsilon_\varphi - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \epsilon_{r\varphi}^2}$ - интенсивность деформаций.

Зависимость коэффициента линейного расширения от температуры предполагается линейной $\alpha_r = A_r + B_r \cdot T$. Компоненты деформаций определяются через перемещения [3]

$$\epsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z}; \quad \epsilon_\varphi = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial \varphi}; \quad \epsilon_{r\varphi} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{v}{r}; \quad (7)$$

Для нахождения минимума функционала \mathcal{E} на поперечное сечение корпуса наносится сеточная область, разбивающая сечение на конечные элементы

$$\omega_{\Delta z, \Delta \varphi}^{\sigma} = \left\{ (z_k = R_1 + i \Delta z_k, \quad \varphi_j = j \cdot \Delta \varphi), \right. \\ \left. k = 0, 1, 2, \dots, M-1; \quad j = 0, 1, 2, \dots, N-1 \right\},$$

где M - число узловых точек по координате z ,

N - число узловых точек по координате φ ,

Δz_k - размер конечного элемента по направлению z ,

$\Delta \varphi$ - размер конечного элемента по направлению φ .

Распределение температур и перемещений внутри конечного элемента описывается следующими зависимостями

$$\begin{aligned} T &= b_1 + b_2 z + b_3 \varphi + b_4 z \varphi, \\ u &= a_1 + a_2 z + a_3 \varphi + a_4 z \varphi, \\ v &= a_5 + a_6 z + a_7 \varphi + a_8 z \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

где коэффициенты a_k, β_j определяются по значениям перемещений и температур в узлах конечного элемента.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (-\epsilon_k \varphi_k u_i + \epsilon_k \varphi_i u_j - \epsilon_i \varphi_i u_k + \epsilon_i \varphi_k u_e), \\
 a_2 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (\varphi_k u_i - \varphi_i u_j + \varphi_i u_k - \varphi_k u_e), \\
 a_3 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (\epsilon_k u_i - \epsilon_k u_j + \epsilon_i u_k - \epsilon_i u_e), \\
 a_4 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (-u_i + u_j - u_k + u_e), \\
 a_5 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (-\epsilon_k \varphi_i v_i + \epsilon_k \varphi_i v_j - \epsilon_i \varphi_i v_k + \epsilon_i \varphi_k v_e), \\
 a_6 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (\varphi_k v_i - \varphi_i v_j + \varphi_i v_k - \varphi_k v_e), \\
 a_7 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (\epsilon_k v_i - \epsilon_k v_j + \epsilon_i v_k - \epsilon_i v_e), \\
 a_8 &= \frac{1}{\Delta \epsilon \Delta \varphi} (-v_i + v_j - v_k + v_e).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Деформации внутри конечного элемента записываются через перемещения в узлах

$$\begin{aligned}
 \epsilon_\epsilon &= a_2 + a_4 \varphi, \quad \epsilon_\rho = \frac{a_1 + a_3}{\epsilon} + \frac{a_3}{\epsilon} \varphi + a_4 \varphi + a_2 + a_8, \\
 \epsilon_{\epsilon \varphi} &= a_4 + \frac{a_3 - a_5 - a_7}{\epsilon}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Выразим деформации $\epsilon_\rho, \epsilon_\epsilon, \epsilon_{\epsilon \varphi}$ с использованием выражений (9), (10) и подставим их в уравнение Лагранжа. Произведя интегрирование по сечению конечного элемента и просуммировав по всем элементам, получаем потенциальную энергию деформации рассматриваемой конструкции, записанную в перемещениях узловых точек. Из условия минимума потенциальной энергии следует система алгебраических уравнений для определения перемещений узлов конечных элементов.

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_i} = \frac{\partial \sum_{m=1}^{M_i} \mathcal{E}_m}{\partial u_i} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial v_i} = \frac{\partial \sum_{m=1}^{M_i} \mathcal{E}_m}{\partial v_i} = 0, \quad (II)$$

где M_i -- число конечных элементов,
 i -- номер узловой точки.

Система уравнений решается методом Зейделя с применением коэффициента верхней релаксации $\beta = 1.8$ [4]. По перемещениям узловых точек производится расчет деформаций и напряжений в центрах тяжести конечных элементов. Напряжения определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_0 + 2G'(\epsilon_z - \epsilon_0 - \epsilon_T), \\ \sigma_\varphi &= \sigma_0 + 2G'(\epsilon_\varphi - \epsilon_0 - \epsilon_T), \\ \sigma_z &= \sigma_0 + 2G'(\epsilon_z - \epsilon_0 - \epsilon_T), \\ \sigma_{z\varphi} &= G'\epsilon_{z\varphi}, \end{aligned} \quad (I2)$$

где $\sigma_0 = \kappa \epsilon_0$ -- среднее напряжение,

$$G' = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ -- модуль сдвига.}$$

При появлении в корпусе зоны пластичности производится пересчет констант

$$E' = \frac{\sigma_i}{\epsilon_i}, \quad \nu' = \frac{1}{2} - \frac{1-2\nu}{E} \cdot \frac{\sigma_i}{\epsilon_i}$$

где E -- модуль упругости,
 ν -- коэффициент Пуассона,

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_z)^2 + 6\sigma_{z\varphi}^2}$$

интенсивность напряжений.

Уточнение приведенного модуля деформации E' в каждом элементе производится методом последовательных приближений. Осевая деформация ϵ_z рассчитывается методом хорд, исходя из баланса сил, действующих в поперечном сечении корпуса

$$\int \sigma_z dS - \pi R^2 \rho(r) = 0 \quad (I3)$$

4. Описанные методы были использованы ^{при} для разработки программы расчета температур и напряженного состояния /ФОРТРАН, ЕС-1030/. Здесь приводятся результаты расчетов с помощью этих программ для процессов, сопровождавших срабатывание аварийной защиты на I блоке Билибинской АТЭЦ и процессы регулирования мощности в установке "Север-2" /рис. I/.

вет 4

На рис. 2 приведены графики экспериментальной, и расчетной разностей температур между верхней и нижней образующими корпуса барабана-сепаратора Билибинской АТЭЦ. Экспериментальная кривая, полученная после срабатывания аварийной защиты, эквидистантна и близка к расчетной для всего переходного процесса. Данный пример показывает способность расчетной схемы описывать реальные процессы, происходящие в корпусах барабанов-сепараторов в переходных режимах.

На рис. 3+6 приведены изменения характерных разностей температур и напряжения в корпусе барабана-сепаратора установки "Север-2" в переходных режимах изменения давления.

вет 5
зависа

Приведенная схема решения уравнений, описывающих термонапряженное состояние корпусов барабанов-сепараторов, ^{может быть использована} нецелесообразна при оценке их работоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н.Тихонов, С.А.Самарский. Уравнения математической физики. М., Изд. "Наука", 1966.
2. В.В.Пискун и др. Решение пространственной осесимметричной задачи термопластичности применительно к толстым турбинным дискам. "Проблемы прочности", №5, 1974г.
3. Н.И.Безухов. Теория упругости и пластичности. Издательство технико-теоретической литературы, 1953г.
4. О.Зенкевич. Метод конечных элементов в технике. М., Изд. "Мир", 1976г.

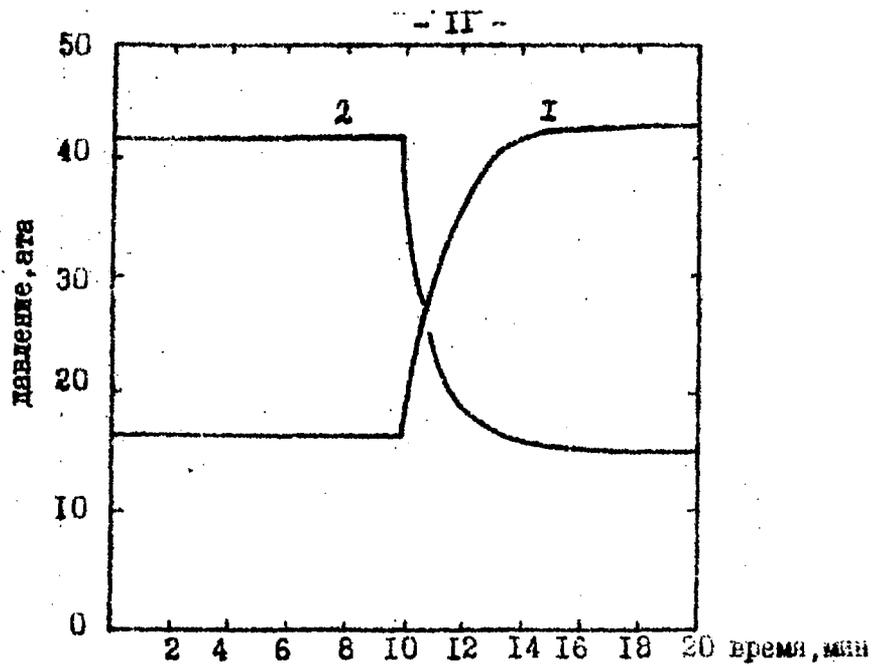


Рис.1. Изменение давления в барабане-сепараторе при резких изменениях отбора пара.
 I-снижение отбора пара с 28т/час до 5,6т/час,
 2-увеличение отбора пара с 5,6т/час до 28т/час.

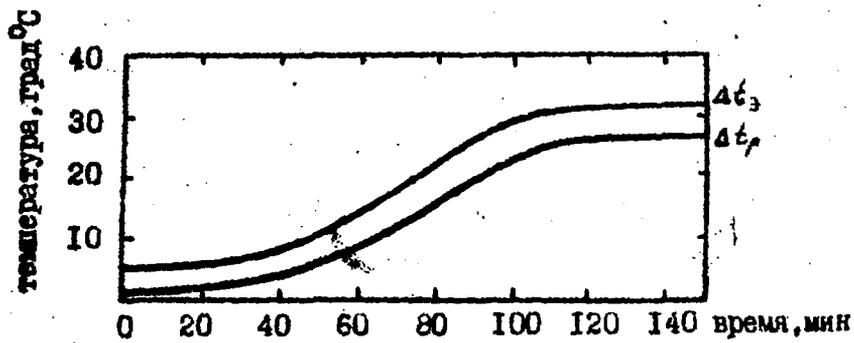


Рис.2. Изменение разности температур по образующим барабана-сепаратора БАТЭЦ.

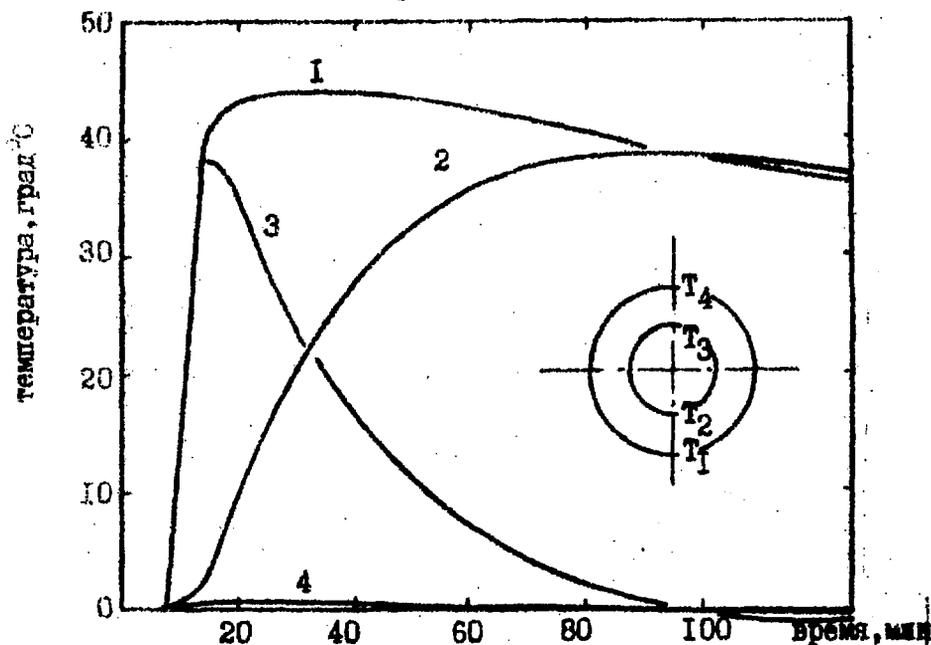


Рис.3. Изменение разностей температур корпуса в процессе снижения давления: (1-(T_3-T_2); 2-(T_4-T_1); 3-(T_1-T_2); 4-(T_4-T_3)).

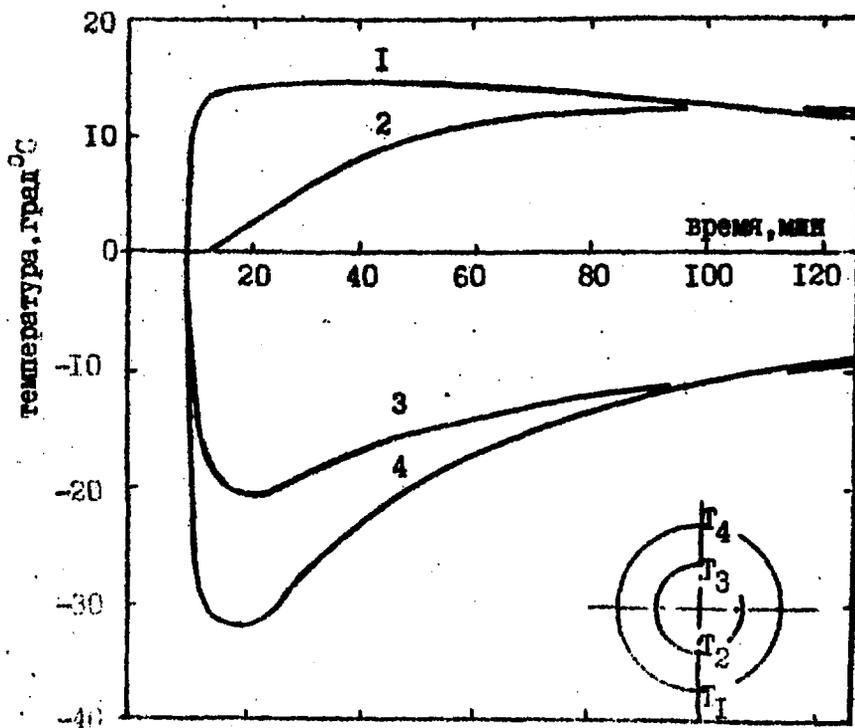


Рис.4. Изменение разностей температур корпуса в процессе увеличения давления: (1-(T_2-T_3); 2-(T_1-T_4); 3-(T_1-T_2); 4-(T_4-T_3)).

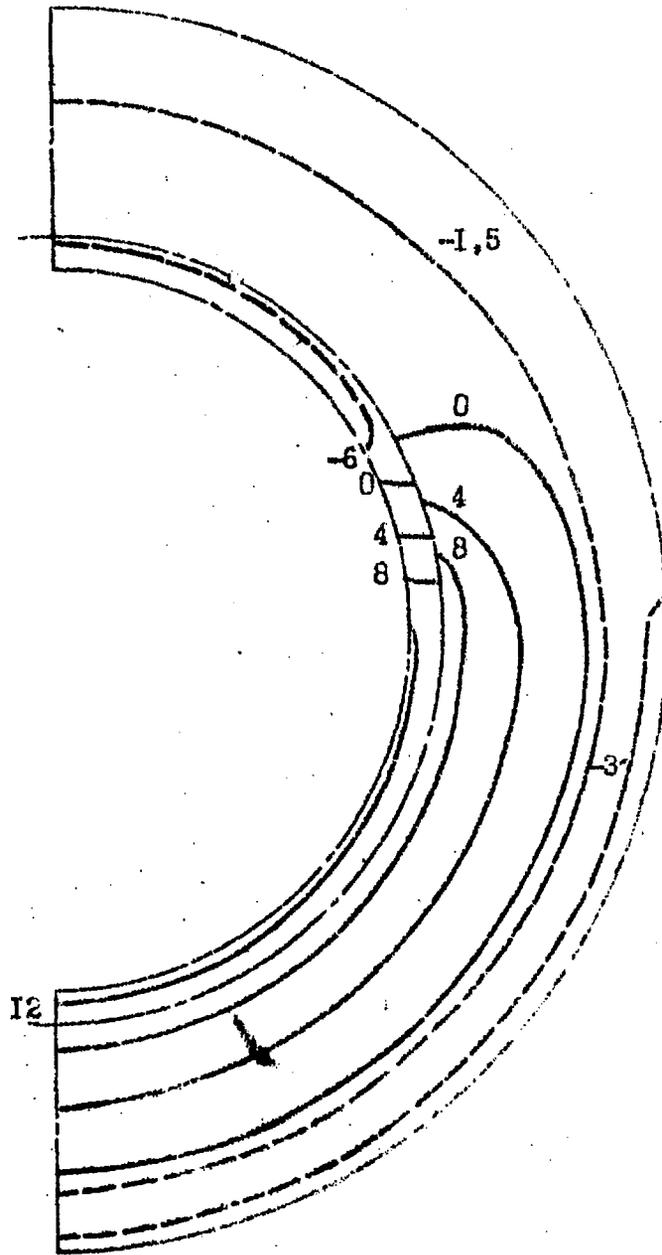


Рис.5. Распределение осевых напряжений в корпусе барабана-сепаратора при снижении давления, $p = 16 \text{ мм рт.ст.}$. Цифрами даны значения напряжений в кг/см^2 .

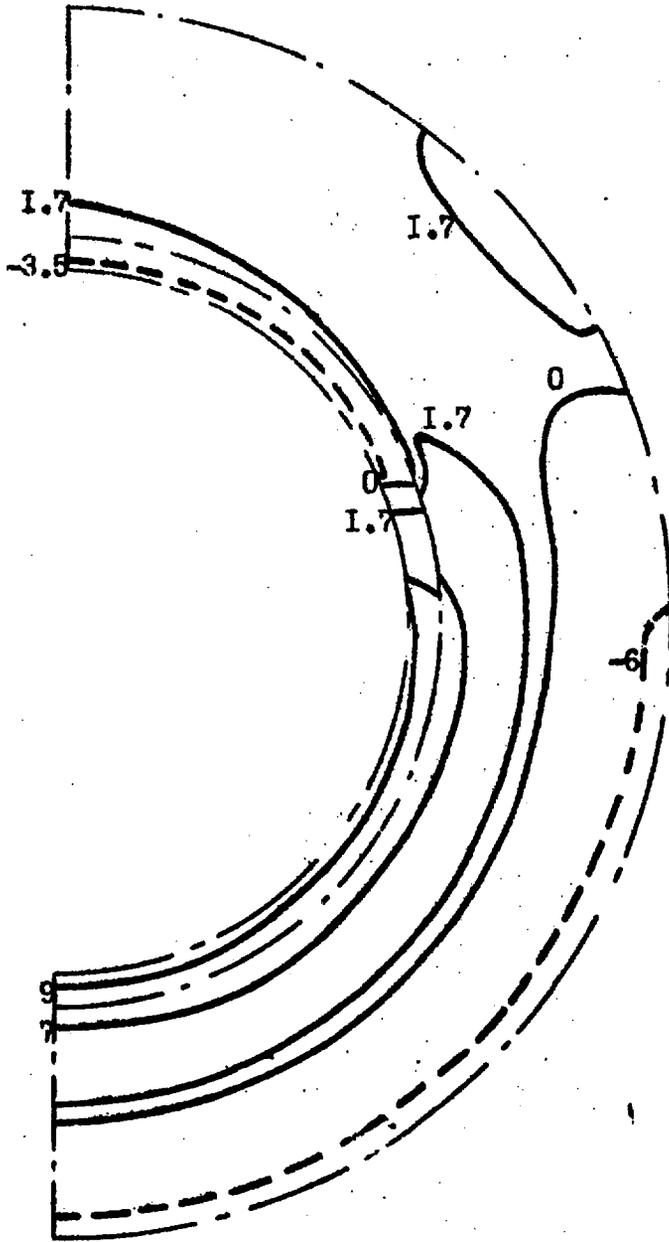


Рис.6. Распределение окружных напряжений σ_{ϕ} в корпусе барабана-сепаратора при снижении давления, $\tau=16$ мин. Цифрами даны значения напряжений в кг/мм².



Подписано в печать 29/УШ-1979 Т-11986. Формат 60x90 1/16
Офсетная печать Усл.п.л. 0,8 Уч.-изд.л. 0,6 Тираж 120 экз.
Заказ № 987 Цена 6 коп. Индекс 3624 ФЭИ-972

Отпечатано на ротапринтере ФЭИ, г.Обнинск

6 коп.

Индекс 3624