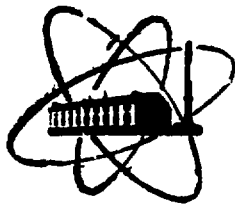


506006300



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  $\tau$  - 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  $\nu = 0, \pi$  ;

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

на внутренней границе корпуса,

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

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

$T_в$  - температура водяной среды,

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

$T_H, \alpha_H$  - 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:

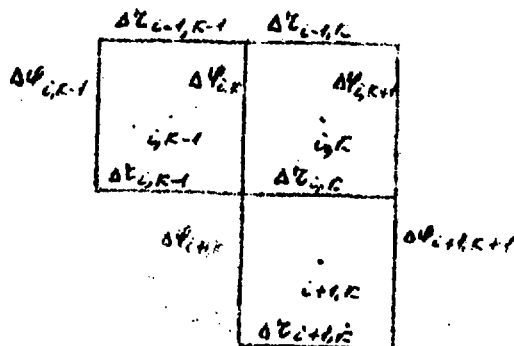
$$\omega_{\Delta r, \Delta \varphi, \Delta z} = \left\{ \left( r_k = R_i + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta r_k + \frac{\Delta r_k}{2}, \quad \varphi_i = (i - \frac{1}{2}) \Delta \varphi, \quad z_j = j \cdot \Delta z \right), \right. \\ \left. k = 1, 2, \dots, M; \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 0, \frac{1}{2},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

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

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

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

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

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

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

Переход от временного шага  $j$  к шагу  $j+1$  осуществляется в 2 этапа с шагами  $\frac{\Delta \varphi}{2}$ : решаются уравнения (4) неявные по направлению  $z$ , и явные по направлению  $\varphi$ , а затем уравнения (5) явные по  $z$  и неявные по  $\varphi$ . Для решения каждой из этих систем подсистемы одновременных уравнений по неявному направлению решаются методом прогонки [1], который требует задания коэффициентов прогонки  $\gamma$  и  $\beta$  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  $P(t_i)$ .

Решается обобщенная плоскодеформированная задача, т.е. осевая деформация  $\epsilon_z$  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,  
 $\kappa$  - 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,  
 $\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_\varphi)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\varphi)^2} + \frac{3}{2} \epsilon_{z\varphi}$  - интенсивность деформаций.

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

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

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

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

где  $M$  - число узловых точек по координате  $r$ ,

$N$  - число узловых точек по координате  $\varphi$ ,

$\Delta r_k$  - размер конечного элемента по направлению  $r$ ,

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

Распределение температур и перемещений внутри конечного элемента описывается следующими зависимостями

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



где коэффициенты  $a_k, \beta_j$  определяются по значениям перемещений и температур в узлах конечного элемента.

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

Деформации внутри конечного элемента записываются через перемещения в узлах

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

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.

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

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,

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

При появлении в корпусе зоны пластичности производится пересчет констант

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

где  $E$  -- модуль упругости,  
 $\mu$  -- коэффициент Пуассона,

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

интенсивность напряжений.

Уточнение приведенного модуля деформации  $E'$  в каждом элементе производится методом последовательных приближений. Осевая деформация  $\epsilon_z$  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 <sup>при</sup> 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, <sup>может быть использована</sup> 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.

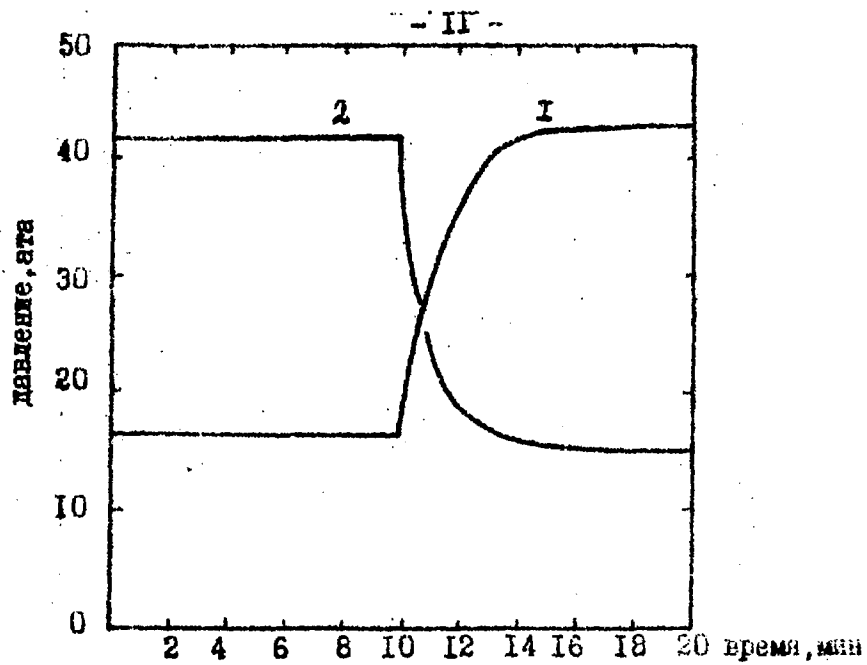


Рис.1. Изменение давления в барабане-сепараторе при резких изменениях отбора пара.  
 I-снижение отбора пара с 28т/час до 5,6т/час,  
 2-увеличение отбора пара с 5,6т/час до 28т/час.

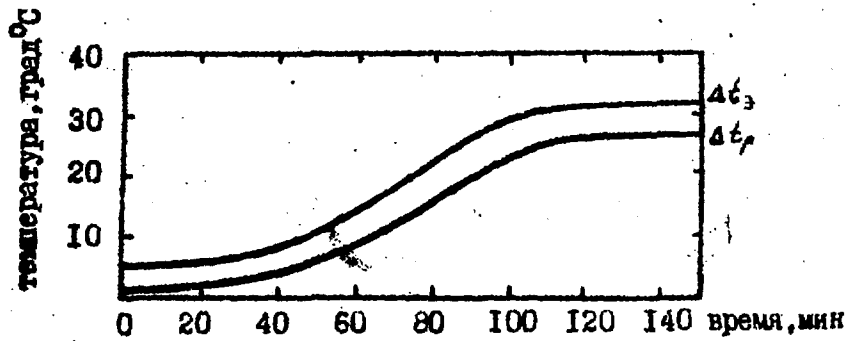


Рис.2. Изменение разности температур по образующим барабана-сепаратора БАТЭЦ.

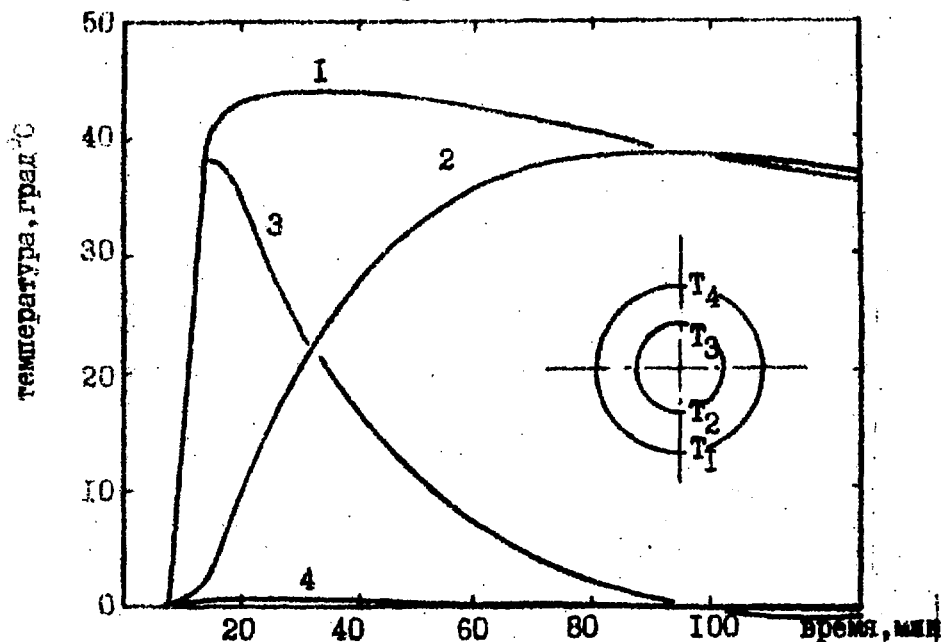


Рис.3. Изменение разностей температур корпуса в процессе снижения давления: (1-( $T_3-T_2$ ); 2-( $T_4-T_1$ ); 3-( $T_1-T_2$ ); 4-( $T_4-T_3$ )).

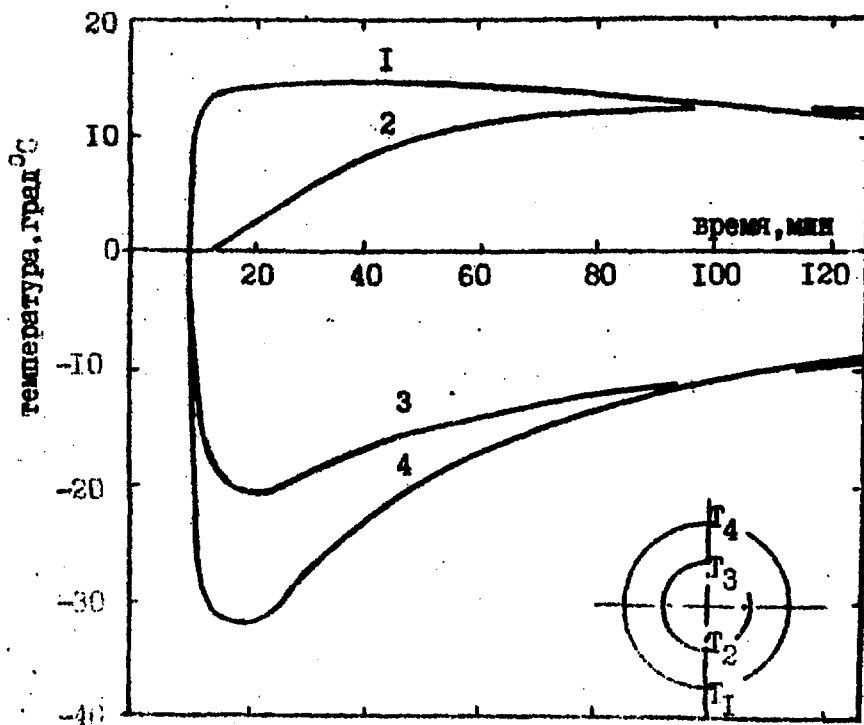


Рис.4. Изменение разностей температур корпуса в процессе увеличения давления: (1-( $T_2-T_3$ ); 2-( $T_1-T_4$ ); 3-( $T_1-T_2$ ); 4-( $T_4-T_3$ )).

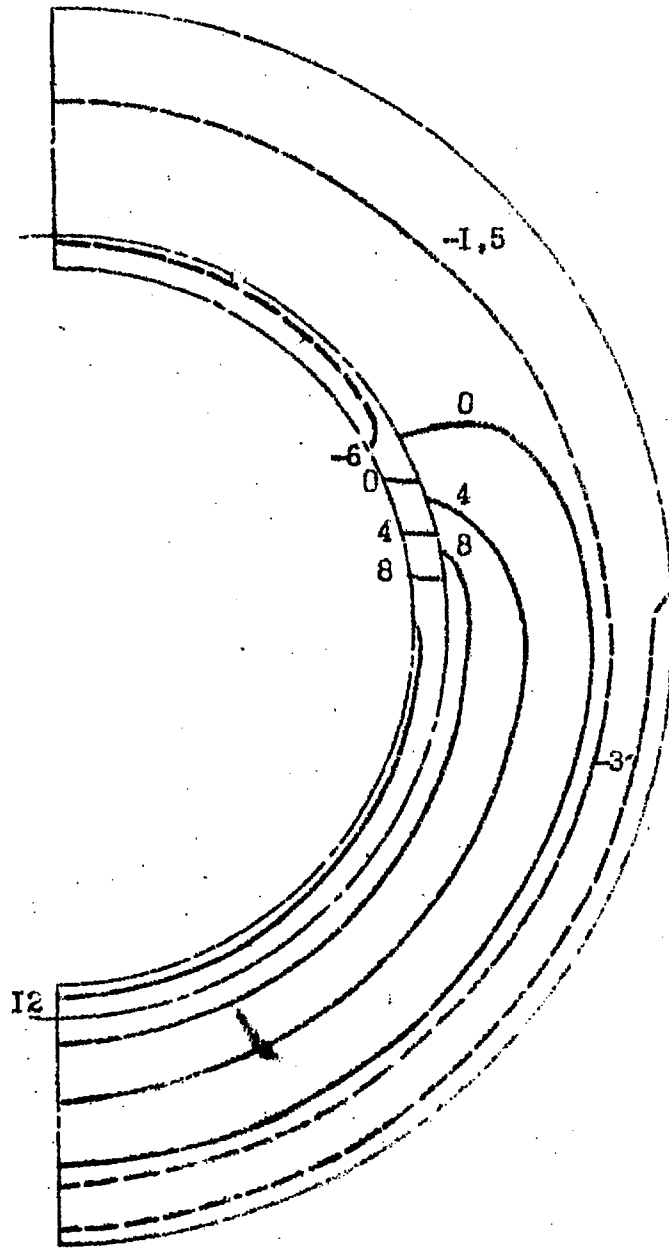


Рис.5. Распределение осевых напряжений в корпусе барабана-сепаратора при снижении давления,  $p = 16 \text{ мм. рт. ст.}$ . Цифрами даны значения напряжений в кг/см<sup>2</sup>.

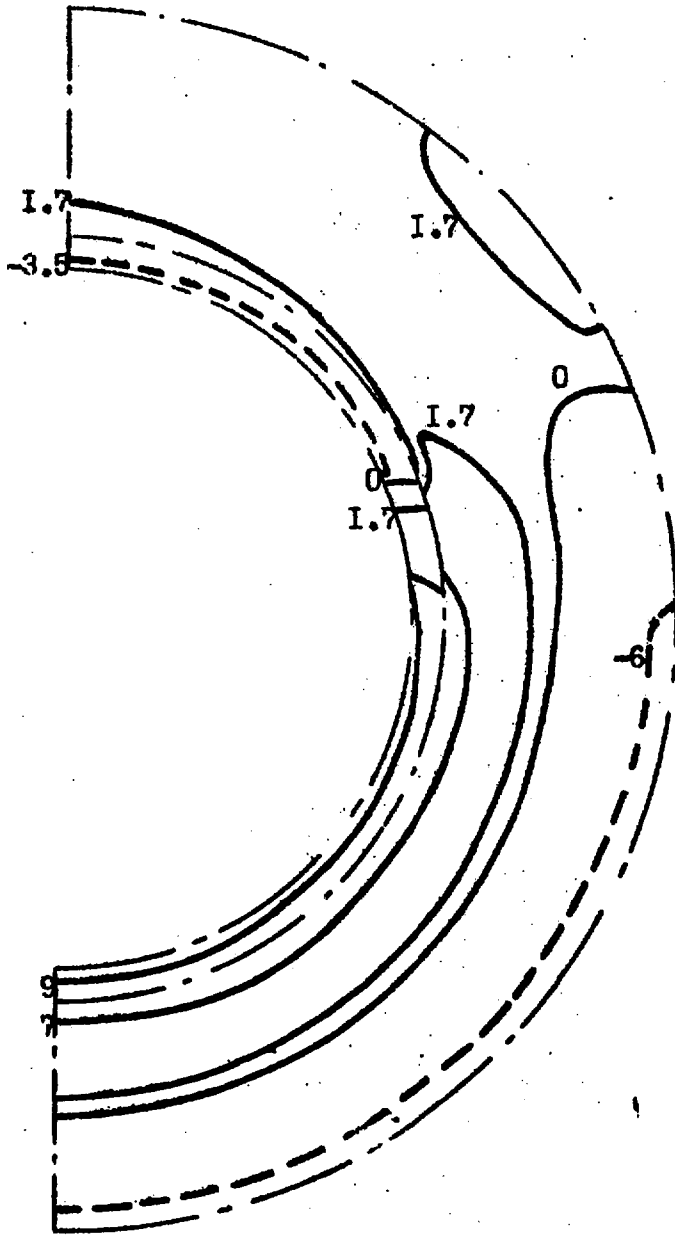


Рис.6. Распределение окружных напряжений  $\sigma_{\phi}$  в корпусе барабана-сепаратора при снижении давления,  $\tau=16$  мин. Цифрами даны значения напряжений в кг/мм<sup>2</sup>.



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**