ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ
КОТЛОТУРБИННЫЙ ИНСТИТУТ им. И. И. ПОЛЗУНОВА

РУКОВОДЯЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ТУРБИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СПИРАЛЬНЫХ КАМЕР

РТМ 24.022.04—72

ЛЕНИНГРАД

gost.e-ecolog.ru

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ
КОТЛОТУРБИННЫЙ ИНСТИТУТ им. И. И. ПОЛЗУНОВА

РУКОВОДЯЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ТУРБИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СПИРАЛЬНЫХ КАМЕР

РТМ 24.022.04—72

ЛЕНИНГРАД

РАЗРАБОТАНЫ Центральным научно-исследовательским и проектно-конструкторским котлотурбинным институтом им. И. И. Ползунова

Директор	**МАРКОВ Н. М.**
Начальник отдела гидротурбин	**ГРИГОРЬЕВ В. И.**
Руководитель темы	**ПОСТОЕВ В. С.**
Исполнитель	**ЗИНДМАН А. П.**
Заведующий базовым отраслевым отделом стандартизации	**БАРАНОВ А. П.**
Заведующий сектором турбин и турбовспомогательного оборудования	**СУКОНКИН П. И.**

Харьковским турбинным заводом им. С. М. Кирова

Главный конструктор гидротурбин	**РОБУК Н. Н.**
Исполнители:	**ПУПКО Т. Е.,**
	ФРИДМАН Л. И.

Ленинградским металлическим заводом им. XXII съезда КПСС

Главный конструктор гидротурбин	**ЩЕГОЛЕВ Г. С.**
Исполнители:	**АРОНСОН А. Я.,**
	ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ Г. Х.,
	БЕРХОВ Н. Ф.,
	ДМИТРИЕВА Л. Д.,
	ИВАНОВ С. В.

ПОДГОТОВЛЕНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ Главтурбопромом Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Главный инженер	**ПОЛИЩУК В. Л.**

УТВЕРЖДЕНЫ Министерством тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Заместитель министра	**СИРЫЙ П. О.**

УДК 621.224.–225.12:539.4.001.24(083.75)

Группа Е02

РУКОВОДЯЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ТУРБИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СПИРАЛЬНЫХ КАМЕР

РТМ 24.022.04—72

Указанием Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения от 6 апреля 1972 г. № ПС-002/6019 введены как рекомендуемые.

Настоящие руководящие технические материалы устанавливают методы расчета на прочность спиральных камер и статоров гидротурбин, не подкрепленных железобетонным блоком и подкрепленных со стороны статора железобетонным поясом.

В настоящее время существует несколько методов расчета на прочность спиральных камер. Из них наиболее полно разработаны метод ЦКТИ—ХТГЗ и метод ЛМЗ. Поэтому в руководящих технических материалах приведены оба этих метода. По мере накопления опытных и расчетных данных предполагается создать единый метод расчета, который будет отражен в следующих изданиях РТМ.

Разделы 1—4 разработаны ЦКТИ и ХТГЗ, разделы 5—14—ЛМЗ.

1. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА СТАТОРА И СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ, НЕ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ БЛОКОМ

1.1. Разработанный алгоритм запрограммирован на АЛГОЛЕ и реализован на ЭЦВМ «М-220» с использованием транслятора ТА—1М.

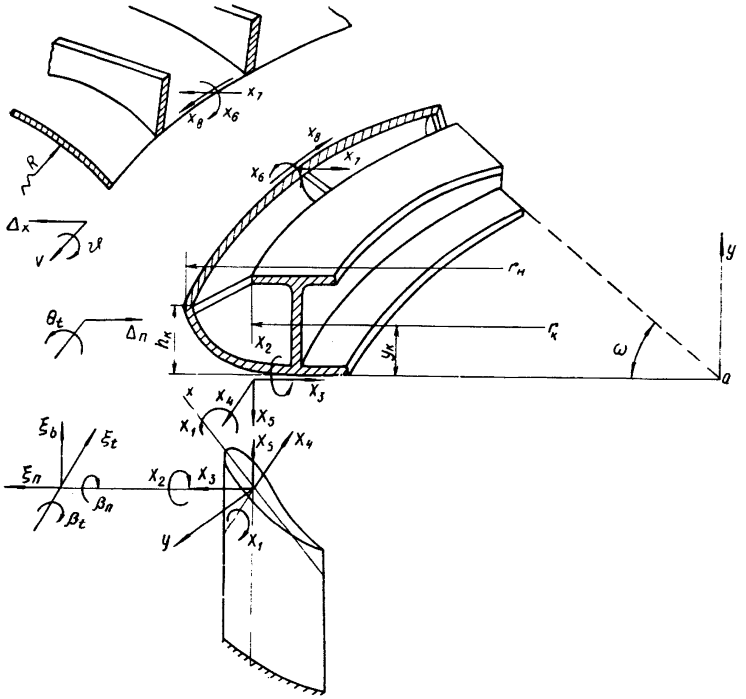
1.2. Конструктивно спиральная камера состоит из трех элементов: оболочки (гладкая или оребренная), колец статора и колонн. Решается задача определения усилий в элементах статорного

Издание официальное

Перепечатка воспрещена

узла при воздействии на торообразную оболочку внутреннего гидростатического давления.

1.3. Задача о сопряжении оболочки спиральной камеры со статорным кольцом и колоннами представляется в виде симметричной расчетной схемы: предполагается, что со стороны спиральной камеры на кольцо статора действуют усилия, равномерно распреде-



Черт. 1

ленные по окружности сопряжения. Эти усилия принимаются равными усилиям, возникающим во входном сечении спиральной камеры.

1.4. Конструкция спиральной камеры со статором представляет собой статически неопределимую систему, состоящую из трех взаимно связанных элементов: оболочки, кольца и колонны.

Степень статической неопределимости будет определяться восемью неизвестными связями — тремя между кольцом и оболочкой и пятью между кольцом и колонной (черт. 1).

1.5. Если принять положительные направления усилий, перемещений и углов поворота такими, как показано на черт. 1, то условия сопряжения оболочки, кольца и колонны будут следующими:

кольцо — колонна:

$$\left.\begin{aligned} \beta_t + \theta_t &= 0; \\ \beta_n &= 0; \\ \xi_n + \Delta_n + \theta_t y_к &= 0; \\ \xi_t + V_{об} &= 0; \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

кольцо — оболочка:

$$\left.\begin{aligned} \theta_t - \vartheta_{об} &= 0; \\ \Delta_n - \theta_t (h_к - y_к) + \Delta_{x_{об}} &= 0; \\ \Delta_{z_{об}} + \frac{N_к s h_к}{E f_к} - \theta_t (r_u - r_к) &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (1')$$

Уравнения статики кольца:

$$\left.\begin{aligned} x_5 r_к + x_8 r_H - N_к r_к &= 0; \\ - x_4 r_к + x_9 r_H &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (1'')$$

1.6. Условия (1) выражаются через неизвестные усилия после нахождения коэффициентов податливости колонны, кольца и оболочки.

1.7. Приводятся формулы для коэффициентов податливости и перемещений колонны.

Колонны испытывают косой изгиб от сил x_1, x_2, x_3 и x_4 и осевое растяжение от силы x_5.

Коэффициенты податливости колонны, которые определяются по формулам косого изгиба, будут следующими:

$$k_{11} = \frac{h_к}{E}\left(\frac{\cos^2\varphi}{J_x} + \frac{\sin^2\varphi}{J_y}\right); \quad k_{21} = \frac{h_к}{2E}\sin 2\varphi\left(\frac{1}{J_y} - \frac{1}{J_x}\right);$$

$$k_{31} = \frac{h_к^2}{2}\left(\frac{\sin^2\varphi}{J_y} + \frac{\cos^2\varphi}{J_x}\right); \quad k_{41} = \frac{h_к^2}{4E}\sin^2\varphi\left(\frac{1}{J_x} - \frac{1}{J_y}\right);$$

$$k_{22} = \frac{h_к}{E}\left(\frac{\sin^2\varphi}{J_x} + \frac{\cos^2\varphi}{J_y}\right); \quad k_{32} = \frac{h_к^2}{4}\sin 2\varphi\left(\frac{1}{J_y} - \frac{1}{J_x}\right);$$

$$k_{42} = -\frac{h^2_к}{2E}\left(\frac{\cos^2\varphi}{J_y} + \frac{\sin^2\varphi}{J_x}\right); \quad k_{33} = \frac{h_к^3}{3E}\sin 2\varphi\left(\frac{\cos^2\varphi}{J_x} + \frac{\sin^2\varphi}{J_y}\right);$$

$$k_{43} = \frac{h_к^3}{6E}\sin^2\varphi\left(\frac{1}{J_y} - \frac{1}{J_x}\right); \quad k_{44} = \frac{h^3_к}{3E}\left(\frac{\sin^2\varphi}{J_x} + \frac{\cos^2\varphi}{J_y}\right);$$

$$k_{23} = k_{32}; \quad k_{24} = k_{42}; \quad k_{12} = k_{21}; \quad k_{34} = k_{43}; \quad k_{55} = \frac{h_к}{EF}.$$

Перемещения и поворот колонн определяются через коэффициенты податливости и неизвестные усилия по формулам:

$$\left.\begin{aligned}
\beta_t &= \frac{2\pi r_к}{n}(k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + k_{13}x_3 + k_{14}x_4);\\
\beta_n &= \frac{2\pi r_к}{n}(k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + k_{23}x_3 + k_{24}x_4);\\
\xi_t &= \frac{2\pi r_к}{n}(k_{31}x_1 + k_{32}x_2 + k_{33}x_3 + k_{34}x_4);\\
\xi_n &= \frac{2\pi r_к}{n}(k_{41}x_1 + k_{42}x_2 + k_{43}x_3 + k_{44}x_4);\\
\xi_э &= \frac{2\pi r_к}{n}k_{55}x_5.
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

1.8. Приводятся формулы для коэффициентов податливости и перемещений кольца.

Все известные нагрузки приводятся к эквивалентным нагрузкам, приложенным к дуге окружности радиуса $r_к$, который определяется как пересечение нейтральной оси кольца с осью колонны, и могут быть приведены к моменту $M_к$ и растягивающей силе Q_H (черт. 2):

$$M_к = \frac{1}{r_к}[P_v(r_v - r_к) + P_a(r_к - r_a)r_a - P_H(y_к - h_к + h_u)r_u + \\ + V_б(r_б - r_к)r_б - H_б h_б r_б];$$

$$Q_H = \frac{1}{r_к}(H_б r_б - P_H r_H).$$

Поворот кольца a_1 от единичного момента, равномерно распределенного по кольцу, и радиальное смещение кольца a_3 от единичной силы определяются по формулам:

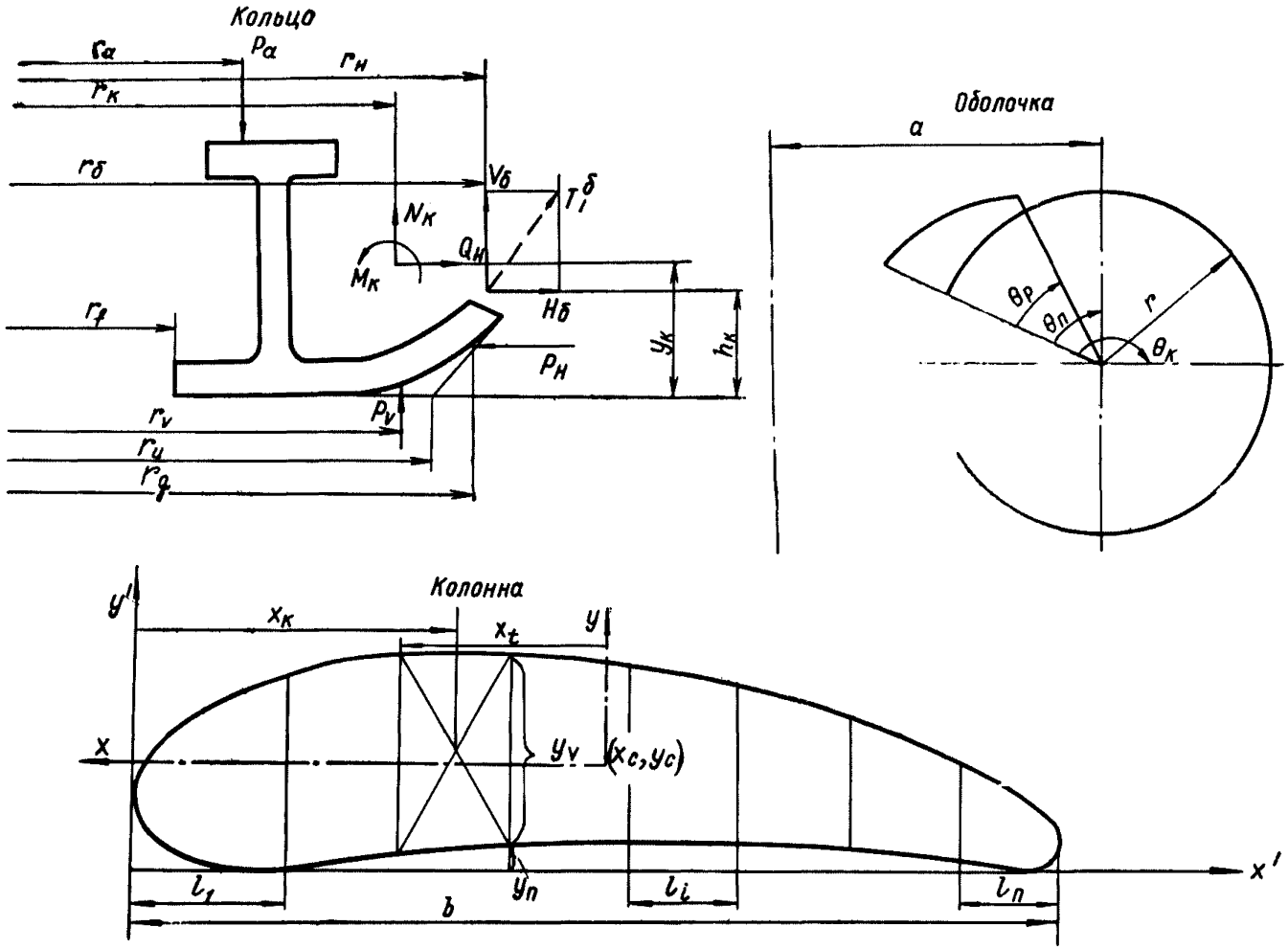
$$a_1 = \frac{r_к}{EJ_c}; \quad a_3 = \frac{r_к}{EF_c}.$$

Поворот и перемещение кольца будут равны:

$$\left.\begin{aligned}
\theta_t &= a_1x_1 + a_1y_кx_3 + a_1\frac{r_n}{r_к}x_6 - a_1\frac{r_n}{r_к}(y_к - h_к)x_7 + \\
&+ a_1\frac{r_H}{r_к}(r_H - r_к)x_8 - a_1M_к;\\
\Delta n &= a_3x_3 - \frac{r_n}{r_к}x_7 - a_3Q_H.
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

1.9. Формулы коэффициентов податливости и перемещений оболочки

1.9.1. Задача расчета оболочки решается численно — методом конечных разностей.


Кольцо
Оболочка
Колонна
r_a
P_a
$r_н$
$r_к$
$r_б$
$V_б$
$T_1^б$
$N_к$
$M_к$
$Q_н$
$H_б$
r_f
$P_н$
$y_к$
$h_к$
r_v
P_v
r_u
r_g
a
$\theta_р$
$\theta_п$
r
$\theta_к$
y'
$x_к$
x_t
y
x
y_v
(x_c, y_c)
$y_п$
l_1
l_i
$l_п$
b
x'

Черт. 2

Для численного расчета изгиба произвольных оболочек вращения на осесимметричную нагрузку разрешающие дифференциальные уравнения задачи записываются в виде [1]:

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{R_1}\cdot\frac{dM_1}{d\theta}+\frac{\cos\theta}{A_2}(M_1-M_2)-N=0;\\ A_2\frac{1}{R_1}\cdot\frac{d\varepsilon_2}{d\theta}+\cos\theta(\varepsilon_2-\varepsilon_1)+\sin\theta\vartheta=0. \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Изгибающие моменты M_1 и M_2 выражаются через деформации из соотношений упругости для оребренной оболочки:

$$M_1=D_1\varkappa_1+\nu D\varkappa_2+k\varepsilon_1;$$
$$M_2=D(\varkappa_2+\nu\varkappa_1).$$

Из тех же соотношений упругости следует:

$$\varepsilon_1=\frac{1}{B_1-\nu^2B}(T_1-\nu T_2)-\frac{\Phi}{B_1-\nu^2B}\varkappa;$$

$$\varepsilon_2=\frac{1}{B}T_2-\nu\varepsilon_1.$$

1.9.2. Если ввести две функции: V и ϑ, которые известны как переменные Майсснера, то все величины, входящие в уравнения (4), можно представить в виде:

$$T_2=\frac{1}{R_1}\cdot\frac{dV}{d\theta};\quad T_1=\frac{\cos\theta}{A_2}V+F_1(\theta);$$

$$N=\frac{\sin\theta}{A_2}V+F_2(\theta).$$

Здесь $F_1(\theta)$ и $F_2(\theta)$ зависят от внешних нагрузок следующим образом:

$$F_1(\theta)=\frac{1}{A_2}\left[\sin\theta\left(\int_{\theta_0}^{\theta}A_2E_zR_1d\theta+\frac{P_z}{2\pi}\right)-\cos\theta\int_{\theta_0}^{\theta}A_2E_xR_1d\theta\right];$$

$$F_2(\theta)=\frac{1}{A_2}\left[\cos\theta\left(\int_{\theta_0}^{\theta}A_2E_zR_1d\theta+\frac{P_z}{2\pi}\right)-\sin\theta\int_{\theta_0}^{\theta}A_2E_xR_1d\theta\right],$$

где $E_z=\cos\theta q_n-\sin\theta q_1$; $E_x=\cos\theta q_1+\sin\theta q_n$;

P_z — значения главного вектора внешних сил, приложенных к границе оболочки.

Компоненты изменения кривизны $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$ выражаются через угол поворота ϑ:

$$\varkappa_1=\frac{1}{R_1}\cdot\frac{d\vartheta}{d\theta};\quad \varkappa_2=\frac{\cos\theta}{A_2}\vartheta.$$

Выражая усилия и деформации через переменные Майсснера и подставляя их в уравнения (4), получим систему двух дифференциальных уравнений второго порядка для решения задачи расчета оболочки.

1.9.3. При решении задачи конечно-разностным методом нет необходимости выводить исходные дифференциальные уравнения. Получение разностных уравнений осуществляется по заданной программе на ЭЦВМ. Для этого связь усилий и моментов с переменными Майсснера представляется в конечно-разностном виде и дальнейший вывод уравнений производится на ЭЦВМ. Полученная система алгебраических уравнений решается по формулам матричной прогонки [4].

Найдя неизвестные системы алгебраических уравнений, в каждой точке разбиения находят усилия, деформации и перемещения.

1.9.4. Расчет оболочки производится для четырех видов единичных нагрузок: распределенного меридионального момента на краю оболочки M_1, распределенного распорного усилия на краю оболочки Q_x, осевого усилия на краю оболочки P_z, равномерного гидростатического давления на оболочку p.

Перемещения и поворот края оболочки спирали при указанных выше нагрузках определяются по формулам:

$$\Delta_{x_{об}} = c_{76}x_6 + c_{77}x_7 + c_{78}x_8 - \Delta_{x_p};$$

$$\Delta_{z_{об}} = c_{86}x_6 + c_{87}x_7 + c_{88}x_8 - \Delta_{z_p};$$

$$\vartheta_{об} = c_{66}x_6 + c_{67}x_7 + c_{68}x_8 - \vartheta_p.$$

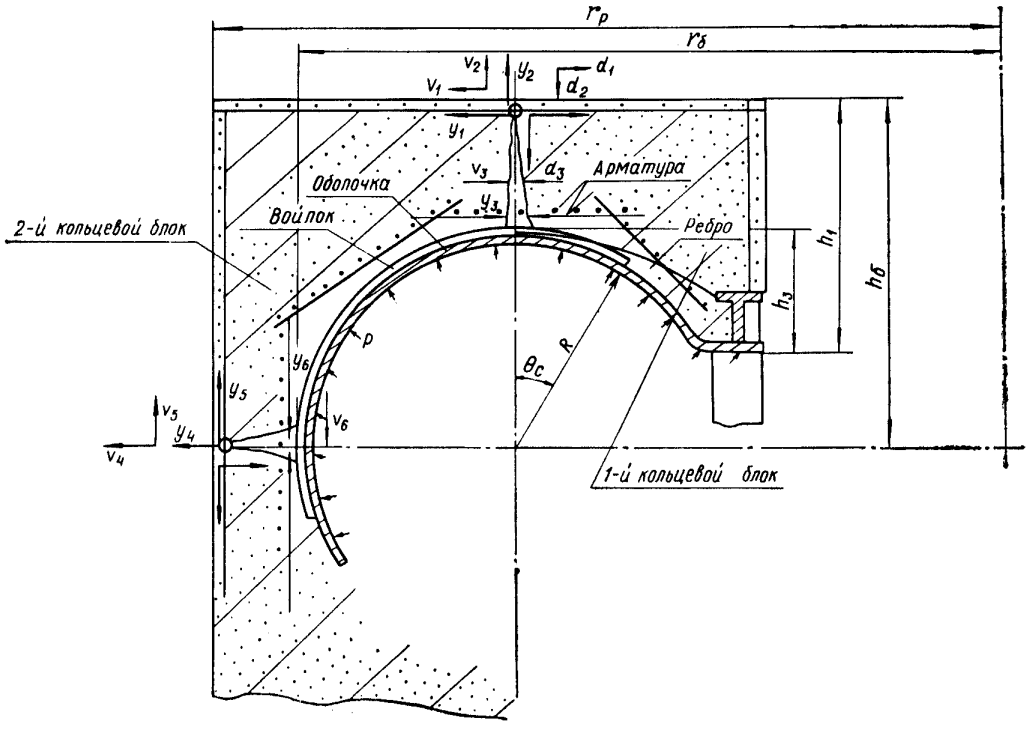
1.10. Подставляя формулы (2) и (3) в уравнения совместности деформаций (1), получаем систему восьми алгебраических уравнений. Решая эту систему уравнений, получим все неизвестные усилия, а затем по известным формулам — напряжения в колоннах, кольце и оболочке.

2. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА СТАТОРА И СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ, ПОДКРЕПЛЕННЫХ СО СТОРОНЫ СТАТОРА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ ПОЯСОМ

2.1. Излагается метод расчета спиральной камеры, работающей совместно с железобетонным блоком агрегата, когда оболочка отделена от блока войлочной прокладкой. Расчет смешанных конструкций, в которых оболочка работает совместно с железобетонным блоком агрегата, не рассматривается.

2.2. Часть оболочки, расположенная выше горизонтального диаметра сечения, отделена от бетонного массива войлочной прокладкой. Таким образом, нагрузка на железобетонный пояс передается через кольцо и забетонированную часть оболочки.

2.3. Рассматривается такое состояние блока, при котором могут образоваться трещины по вертикальному и горизонтальному сечениям как по наиболее слабым сечениям пояса (черт. 3). При-


$r_р$
$r_б$
v_2
y_2
d_1
v_1
d_2
y_1
v_3
d_3
Арматура
Оболочка
y_3
Войлок
Ребро
2-й кольцевой блок
h_1
h_3
$h_б$
p
R
y_6
θ_c
y_5
v_5
v_6
y_4
v_4
1-й кольцевой блок

Черт. 3

нимается, что железобетонный пояс по сечению, где расположены трещины, на изгиб в этой же плоскости не работает. Кольцевые железобетонные элементы, образованные этими трещинами, связаны между собой и нижней частью массива условными шарнирами, максимально удаленными от растянутой меридиональной арматуры блока.

2.4. Предполагается, что в упругом состоянии находится вся конструкция, элементами которой являются: а) оболочка, отделенная прокладкой от бетона, б) колонна статора, в) внутреннее железобетонное кольцо, включающее статорное кольцо и часть забетонированой оболочки, г) наружное бетонное кольцо.

2.5. При выборе расчетной схемы учитывается наличие изложенного в разд. 1 метода расчета статора и спиральной камеры, не подкрепленных железобетонным поясом.

Основная система состоит из двух групп элементов: а) оболочки, колонны, внутреннего железобетонного кольца с кольцом статора и примыкающей оболочкой и в) наружного железобетонного кольца, связанного подвижным шарниром и арматурой с внутренним кольцом и неподвижным шарниром и арматурой с нижним бетонным массивом (черт. 3).

2.6. Степень статической неопределимости будет определяться шестью неизвестными, для определения которых имеются следующие условия сопряжения:

$$\left.\begin{array}{l} v_4 = 0; \quad v_1 + d_1 = 0; \\ v_5 = 0; \quad v_2 + d_2 = 0; \\ v_5 + \gamma_1;\ y_6 = 0;\ v_3 + d_3 + (\eta_2 + \eta_3)\, y_3 = 0, \end{array}\right\} \qquad (5)$$

где η_1, η_2, η_3 — параметры арматуры, определяемые по нормам проектирования [3].

2.7. Условия (5) записываются через неизвестные усилия после нахождения коэффициентов податливости для каждого элемента так же, как в разд. 1. Все формулы приведены в работе [2].

3. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА НА ЭЦВМ

3.1. Для расчета напряженного состояния статора и спиральной камеры без учета железобетонного блока необходимо иметь чертежи статорного кольца, сечения колонны и плана спирали.

3.2. Для статорного кольца находятся геометрические характеристики: центр тяжести, площадь, моменты инерции, затем определяются коэффициенты податливости от усилий, приложенных со стороны оболочки и колонны. Для получения геометрических характеристик на чертеже сечения кольца выбирается система отсчета (обычно по кромкам кольца) таким образом, чтобы все координаты были положительны. Сечение кольца разбивается на произвольное количество прямоугольников n_c, и для каждого пря-

моугольника задаются ширина b_i, высота c_i, расстояние от центра тяжести прямоугольника до горизонтальной оси y_i, расстояние от центра тяжести прямоугольника до оси турбины x_i.

Снимаются с чертежа следующие величины: r_n, r_g, r_f, r_a, $h_к$, r_m, y_m (см. черт. 2).

3.3. Для колонн статора находятся геометрические характеристики: координаты центра тяжести, площадь, момент инерции, затем по формулам косого изгиба стержней определяются коэффициенты податливости.

Для получения геометрических характеристик предусмотрена разбивка колонны на k трапеций, причем высоты трапеций, кроме первой и последней, одинаковы. Обычно так выполняются чертежи поперечного сечения колонны. Для каждой трапеции задаются координаты y_{n_i} и y_{v_i} (см. черт. 2), затем высоты первой трапеции f_1, последней f_n, промежуточной f_i. Кроме того, в исходных данных задаются высота колонны $h_к$, ширина f, угол установки φ, число колонн $n_к$.

3.4. Для оболочки с чертежа снимаются следующие данные (см. черт. 2):

a — расстояние от оси турбины до вертикального диаметра оболочки, *см*;

r — радиус кругового сечения спиральной камеры, *см*;

$\theta_н$ — угол от вертикального диаметра до места сопряжения со статором, *рад*;

$\theta_к$ — угол, характеризующий конец отсчета; обычно берется угол до оси симметрии $\left(\theta_к = \frac{\pi}{2}\right)$, *рад*;

t — толщина оболочки, *см*;

n — число разбиений меридиана оболочки.

3.5. Если оболочка оребрена, то задаются параметры оребрения.

Оребрение принимается несимметричным относительно срединной поверхности оболочки. Можно задавать высоту ребра, изменяющуюся по меридиану по линейному закону либо по полиному третьей степени.

Задаются следующие геометрические характеристики ребер:

b — ширина ребра;

$n_р$ — число ребер;

$t_{р.н}$ — высота ребра в начале отсчета;

$t_{р.к}$ — высота ребра в конце отсчета;

$k_р$ — число разбиений угла охвата ребра; обычно $k_р = \frac{\theta_р}{h}$, где h — шаг разбиения оболочки.

3.6. Если оболочка обжата бандажами, дополнительно необходимо задать:

$h_б$ — расстояние от нейтральной оси кольца до бандажа;

$\theta_б$ — угол охвата бандажа до горизонтального диаметра;
$\sigma_{пр}$ — напряжение предварительного затяга бандажа;
s_0 — длину бандажа до горизонтального диаметра;
$б$ — число бандажей.

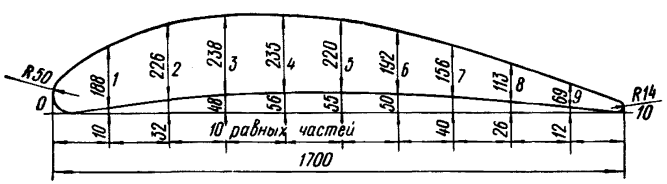
3.7. Для расчета спиральной камеры с учетом подкрепления бетоном необходимо иметь чертеж блока спиральной камеры и арматурный чертеж.

На первом этапе расчета должна быть сосчитана оболочка. Согласно расчетной схеме угол заделки оболочки в статор отсчитывается от начала войлочной прокладки, аналогично отсчитывается начало оребрения.

Кроме исходных данных, которые задаются для спиральной камеры без железобетонного блока, необходимо снять с чертежа геометрические характеристики бетонного массива. Бетонный массив вертикальным и горизонтальным диаметрами разбивается на два кольцевых элемента. Каждое кольцо разбиваем на произвольное количество частей (n_1 и n_2). Для каждой части задается ширина b, высота c, расстояние от центра тяжести до оси турбины и до горизонтальной оси r и y. Для всего железобетонного блока задаются следующие исходные данные: h_1, h_2, h_3, rbt, rp (см. черт. 3).

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

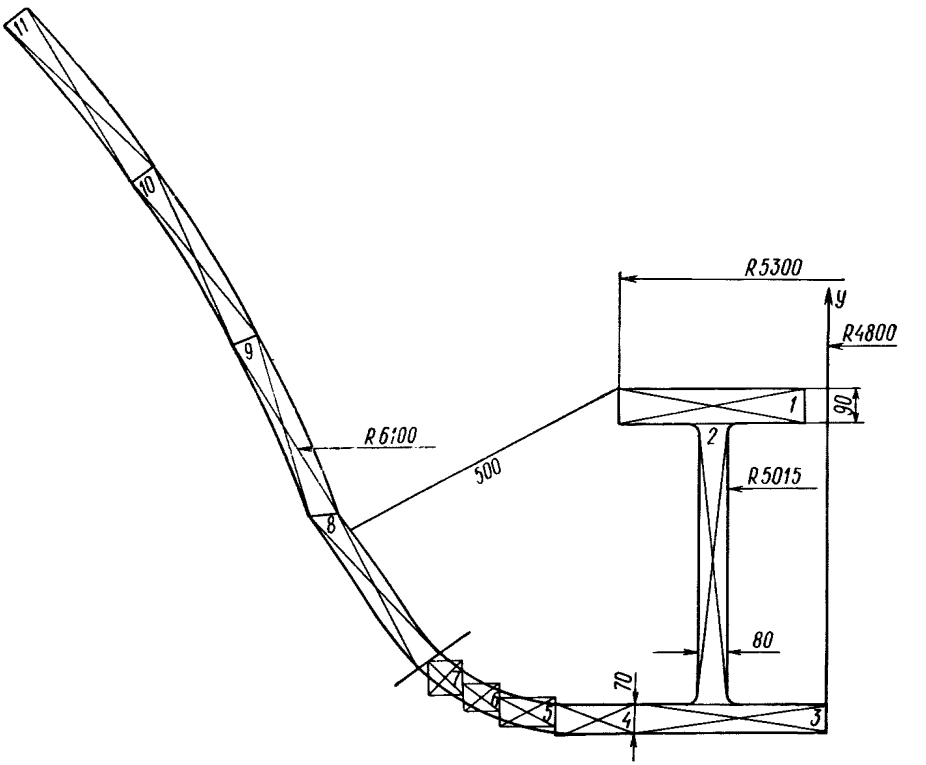
4.1. В качестве примера расчета статора и спиральной камеры без учета железобетонного блока рассматривается спираль на параметры Красноярской ГЭС.



Черт. 4

Прежде всего подготавливаются исходные данные для расчета торообразной оболочки, затем снимаются с чертежа геометрические размеры и подготавливаются исходные данные для колонны и кольца статора (черт. 4, 5).

4.2. Исходные данные для расчета оболочки спиральной камеры Красноярской ГЭС без учета железобетонного блока приведены в табл. 1.



Черт. 5

Таблица 1

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
1	+	+	02	800	n	Число разбиений оболочки
2	+	+	00	0	n_1	Заполняется при сопряжении оболочек
3	+	+	01	100	e	Модуль упругости, *кгс/см²*
4	+	+	00	300	nu	Коэффициент Пуассона
5	+	+	03	425	r	Радиус тора, *см*
6	+	+	04	1007	a	Расстояние от оси оболочки до оси турбины, *см*
7	+	+	00	0	cel	Радиус эллиптического сечения, *см*
8	—	+	01	1204	θ_n	Угол сопряжения оболочки со статором, *рад*
9	+	+	01	15708	$\theta_к$	Угол до горизонтальной оси симметрии, *рад*

Продолжение табл. 1

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
10	+	+	01	700	$k_р$	Число разбиений ребра
11	+	+	00	0	*nrp*	Заполняется при законе оребрения по полиному
12	+	+	01	350	t_0	Толщина оболочки, *см*
13	+	+	02	48	*np*	Число оболочечных ребер
14	+	+	01	32	δ	Ширина ребра, *см*
15	+	+	02	50	*trn*	Высота ребра в начале отсчета, *см*
16	+	+	00	0	*trk*	Высота ребра в конце отсчета, *см*

4.3. Исходные данные для расчета спиральной камеры Красноярской ГЭС без учета железобетонного блока приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
1	+	+	02	100	*k*	Число разбиений поперечного сечения колонны
2	+	+	01	800	*nc*	Число разбиений кольца без учета бетона
3	+	+	02	110	nc_1	Число разбиений кольца с учетом бетона
4	+	+	01	600	n_1	Число разбиений первого бетонного кольца
5	+	+	02	800	*n*	Число разбиений оболочки
6	+	+	03	530	r_m	Координаты точки кольца, в которой находятся напряжения, *см*
7	+	+	02	900	y_m	
8	+	+	03	425	r_1	Радиус оболочки, *см*
9	+	+	04	1007	*a*	Расстояние от оси оболочки до оси турбины, *см*
10	+	+	00	300	*nu*	Коэффициент Пуассона
11	+	+	01	350	*t*	Толщина оболочки, *см*
12	—	+	01	1204	θ_n	Угол сопряжения оболочки со статором, *рад*
13	+	+	02	135	*p*	Гидростатическое давление, *кгс/см*^{2}

Продолжение табл. 2

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
14	+	+	03	610	r_n	Расстояние от оси турбины до места сопряжения оболочки со статором, *см*
15	+	+	03	570	r_g	Черт. 2 (в *см*)
16	+	+	03	475	r_f	Расстояние от оси турбины до внутренней кромки кольца, *см*
17	+	+	00	0	r_a	Расстояние от оси турбины до суммарной осевой нагрузки, *см*
18	+	+	02	580	$h_к$	Высота кольца, *см*
19	+	+	00	0	*ра*	Суммарная осевая нагрузка, *кгс*
20	+	+	00	1143	e_1	Отношение модулей упругости бетона и стали
21	+	+	02	490	$b\,[1:nc_1]$	Геометрические характеристики сечения стального кольца, *см*
	+	+	01	800		
	+	+	02	500		
	+	+	02	200		
	+	+	01	900		
	+	+	01	900		
	+	+	01	900		
	+	+	01	400		
	+	+	01	410		То же, с учетом железобетонного блока
	+	+	01	425		
	+	+	01	445		
22	+	+	01	900	$ck\,[1:nc_1]$	Геометрические характеристики сечения стального кольца, *см*
	+	+	02	730		
	+	+	01	700		
	+	+	01	700		
	+	+	01	700		
	+	+	01	700		
	+	+	01	800		
	+	+	02	400		

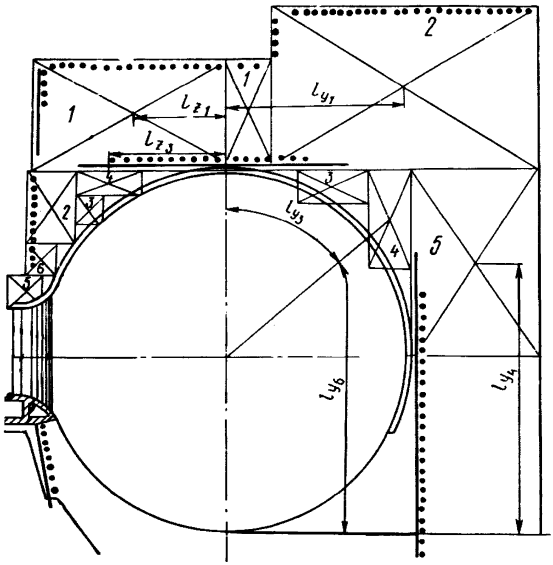
Продолжение табл. 2

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
22	+	+	02	430	$ck\ [1:nc_1]$	То же, с учетом железобетонного блока
	+	+	02	410		
	+	+	02	410		
23	+	+	03	505	$r\ [1:nc_1]$	Геометрические характеристики сечения стального кольца, *см*
	+	+	03	505		
	+	+	03	500		
	+	+	03	535		
	+	+	03	552		
	+	+	03	564		
	+	+	03	573		
	+	+	03	593		
	+	+	03	615		То же, с учетом железобетонного блока
	+	+	03	637		
	+	+	03	668		
24	+	+	02	850	$y\ [1:nc_1]$	Геометрические характеристики сечения стального кольца, *см*
	+	+	02	440		
	+	+	01	350		
	+	+	01	350		
	+	+	01	600		
	+	+	02	100		
	+	+	02	150		
	+	+	02	390		
	+	+	02	800		То же, с учетом железобетонного блока
	+	+	03	122		
	+	+	03	165		
25	+	+	02	170	l_1	Черт. 2 (в *см*)
26	+	+	02	170	l	То же
27	+	+	02	170	$l_к$	»
28	+	+	03	170	b	Ширина колонны, *см*

Продолжение табл. 2

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
29	+	+	03	190	h_{kl}	Высота колонны, *см*
30	+	+	02	120	n_{kl}	Число колонн
31	+	+	01	11695	β	Угол установки колонны, *рад*
32	+	+	03	500	r_x	Радиус выходной кромки колонны, *см*
33	+	+	01	500	$r_{вх}$	Радиус входной кромки колонны, *см*
34	+	+	01	10472	θ_b	Угол охвата бандажа до горизонтального диаметра, *рад*
35	+	+	03	119	s_b	Длина бандажа до горизонтального диаметра, *см*
36	+	+	04	2500	np_b	Напряжение предварительного затяга бандажа, *см*
37	+	+	03	216	n_b	Число бандажей
38	+	+	00	700	d_b	Диаметр сечения бандажа, *см*
39	+	+	01	700	yv	Геометрические характеристики колонны, *см*
	+	+	02	188		
	+	+	02	226		
	+	+	02	238		
	+	+	02	235		
	+	+	02	220		
	+	+	02	192		
	+	+	02	156		
	+	+	02	113		
	+	+	01	690		
	+	+	01	300		
40	+	+	01	100	yn	То же
	+	+	01	100		
	+	+	01	320		
	+	+	01	480		
	+	+	01	560		
	+	+	01	550		
	+	+	01	500		
	+	+	01	400		
	+	+	01	260		
	+	+	01	120		
	+	+	00	000		

4.4. Для расчета статора и спиральной камеры с учетом железобетонного блока необходимо, кроме исходных данных п. 4.3, задать геометрические характеристики бетонного блока, длину рабочей арматуры и площади поперечных сечений арматуры. Разбиение бетонного блока Красноярской ГЭС на два кольцевых элемента приведено на черт. 6. Бетонные кольца разбиваются соответственно на шесть и пять прямоугольников.



Черт. 6

4.5. Исходные данные для расчета оболочки спиральной камеры Красноярской ГЭС с учетом железобетонного блока приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
1	+	+	02	700	*n*	Число разбиений оболочки
2	+	+	00	0	n_1	Заполняется при сопряжении оболочек
3	+	+	01	100	*e*	Модуль упругости, *кгс/см*^{2}
4	+	+	00	300	*пи*	Коэффициент Пуассона

Продолжение табл. 3

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
5	+	+	03	425	r	Радиус тора, *см*
6	+	+	04	1007	a	Расстояние от оси оболочки до оси турбины, *см*
7	+	+	00	0	cel	Радиус эллиптического сечения, *см*
8	—	+	00	8552	θ_n	Угол сопряжения оболочки со статором, *рад*
9	+	+	01	15708	$\theta_к$	Угол до горизонтальной оси симметрии, *рад*
10	+	+	00	0	$k_р$	Число разбиений ребра
11	+	+	00	0	nrp	Заполняется при законе оребрения по полиному
12	+	+	01	35	t_0	Толщина оболочки, *см*

4.6. Дополнительные исходные данные для расчета спиральной камеры Красноярской ГЭС с учетом железобетонного блока приведены в табл. 4.

Таблица 4

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
1	+	+	03	685	r_n	Расстояние от оси турбины до места сопряжения оболочки со статором, *см*
2	+	+	03	182	$h_к$	Высота кольца, *см*
3	—	+	00	855	θ_n	Угол сопряжения оболочки со статором, *рад*
4	+	+	02	700	n	Число разбиения оболочки
5	+	+	03	450	b_1	Геометрические характеристики сечения первого бетонного кольца, *см*
	+	+	03	110		
	+	+	02	900		
	+	+	03	150		
	+	+	02	600		
	+	+	02	700		

Продолжение табл. 4

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
6	+	+	03	260	c_1	То же
	+	+	03	170		
	+	+	02	700		
	+	+	02	500		
	+	+	02	700		
	+	+	02	700		
7	+	+	03	770	r_1	Геометрические характеристики сечения первого бетонного кольца, *см*
	+	+	03	610		
	+	+	03	560		
	+	+	03	750		
	+	+	03	710		
	+	+	03	600		
8	+	+	03	470	y_1	То же
	+	+	03	240		
	+	+	02	400		
	+	+	03	300		
	+	+	03	230		
	+	+	08	120		
9	+	+	01	500	n_2	Число разбиений второго бетонного кольца
10	+	+	03	600	h_1	Черт. 3 (в *см*)
11	+	+	02	900	h_2	„
12	+	+	03	330	h_3	„
13	+	+	04	145	rbt	„
14	+	+	04	175	rp	„
15	+	+	00	650	pcu	Параметры арматуры, *см*
16	+	+	03	225	l_{z_1}	
17	+	+	03	360	l_{y_1}	
18	+	+	03	320	l_{y_3}	
19	+	+	03	225	l_{z_3}	
20	+	+	03	700	l_{y_4}	

Продолжение табл. 4

Номер перфокарты	Знак числа	Знак порядка	Порядок	Число	Идентификатор	Пояснение
21	+	+	03	740	l_{y_6}	Параметры арматуры, $см^2$
22	+	+	00	250	f_{a_1}	
23	+	+	00	250	f_{a_3}	
24	+	+	00	250	f_{a_4}	
25	+	+	00	250	f_{a_6}	
26	+	+	03	110	b_2	Геометрические характеристики сечения второго бетонного кольца, $см$
	+	+	03	620		
	+	+	03	160		
	+	+	03	100		
	+	+	03	300		
27	+	+	03	240	c_2	То же
	+	+	03	380		
	+	+	02	800		
	+	+	03	230		
	+	+	03	430		
28	+	+	04	107	r_2	»
	+	+	04	142		
	+	+	04	126		
	+	+	04	140		
	+	+	04	160		
29	+	+	03	550	y_2	»
	+	+	03	620		
	+	+	03	390		
	+	+	03	320		
	+	+	03	220		

4.7. Графики напряжений, полученные на печатающем устройстве ЭЦВМ «М-220»

4.7.1. Напряжения в колонне у верхнего и нижнего кольца статора без учета железобетонного блока приведены на черт. 7.

Напряжения в колонне с учетом железобетонного блока приведены на черт. 8.

4.7.2. График напряжений в оболочке спирали с учетом и без учета железобетонного блока приведены на черт. 9 и 10.

5. ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СХЕМЫ РАСЧЕТА ЛМЗ И ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

5.1. В применяемых в гидротурбостроении конструкциях спиральных камер и статоров жесткость статора существенно превышает жесткость спиральной камеры, поэтому расчет статора и спиральной камеры производится раздельно: не учитывается влияние жесткости оболочки камеры на перемещения поясов статора.

При наличии дискретно установленных статорных колонн в спиральной камере возникает циклически симметричное напряженное состояние — напряжения в оболочке непосредственно за колоннами существенно выше напряжений между колоннами.

Предлагается производить расчет спиральной камеры на осесимметричную нагрузку, а расчет циклической составляющей напряжений — с помощью поправочных коэффициентов, полученных экспериментально.

5.2. При проектировании спиральных камер принимаются следующие величины допускаемых напряжений, апробированные опытом надежной работы ряда спиральных камер:

— для высокопрочной стали с пределом текучести

$$\sigma_s = 5200 \div 5500 \ кгс/см^2 \quad [\sigma] = 2100 \ кгс/см^2;$$

— для высокопрочной стали с пределом текучести

$$\sigma_s = 4200 \div 4500 \ кгс/см^2 \quad [\sigma] = 1800 \ кгс/см^2;$$

— для углеродистой стали МСт3 с пределом текучести

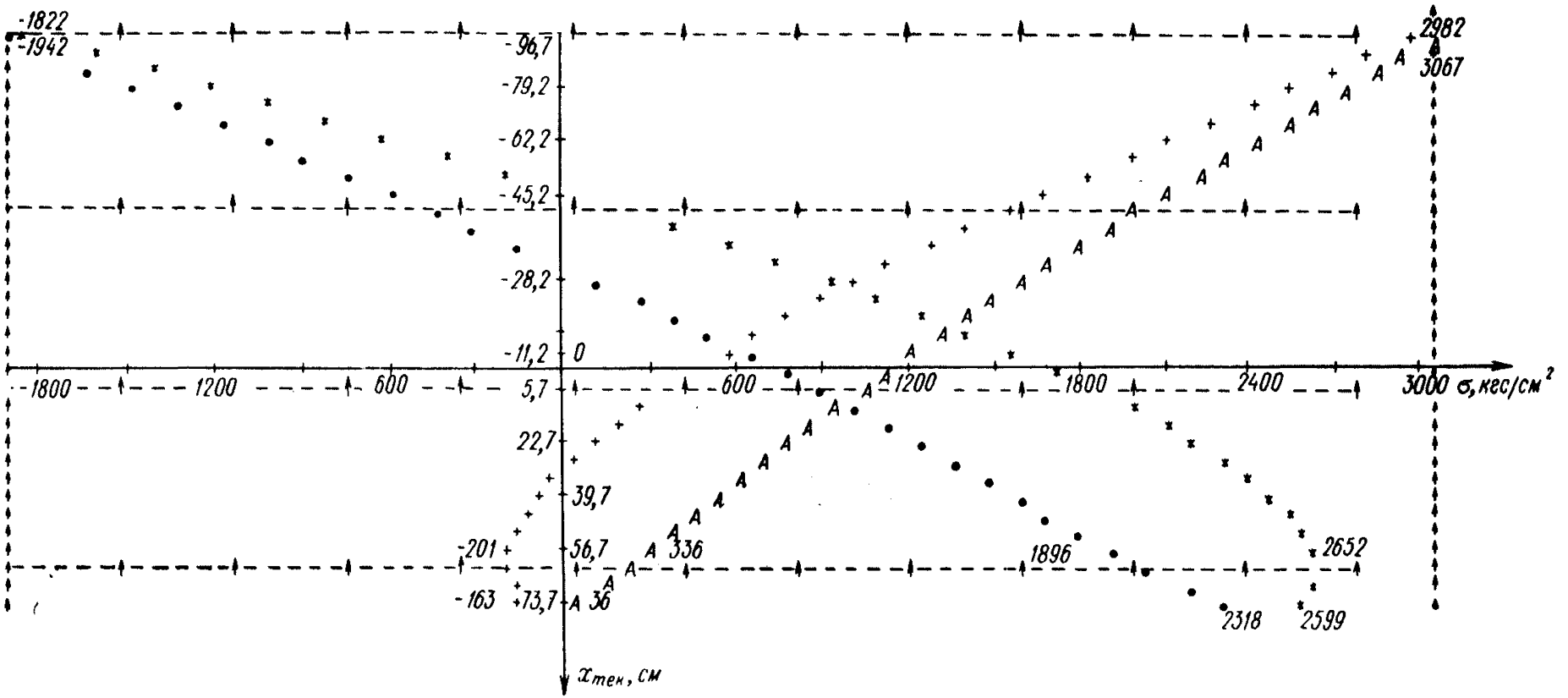
$$\sigma_s = 2400 \ кгс/см^2 \quad [\sigma] = 1200 \ кгс/см^2.$$

Указанные величины допускаемых напряжений лимитируют суммарные напряжения растяжения и изгиба (без учета цикличности), возникающие в спиральной камере.

6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР ТОЛЩИН И МАРОК МАТЕРИАЛОВ ЛИСТОВ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

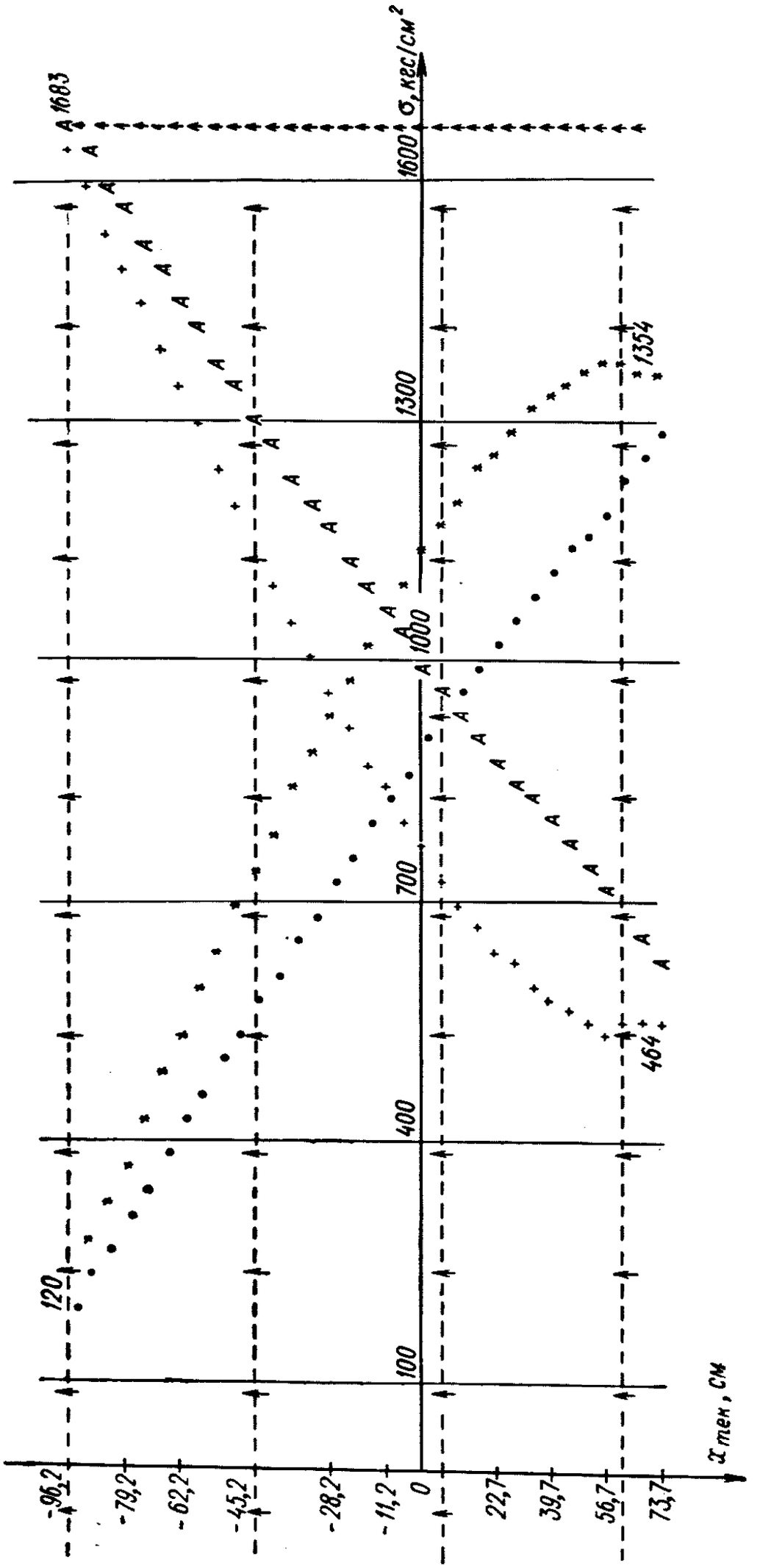
6.1. Выбор толщин и марок материалов листов спиральной камеры производится следующим образом.

По формулам безмоментной теории торообразной оболочки определяются усилия в трех характерных точках каждого сечения (черт. 11):



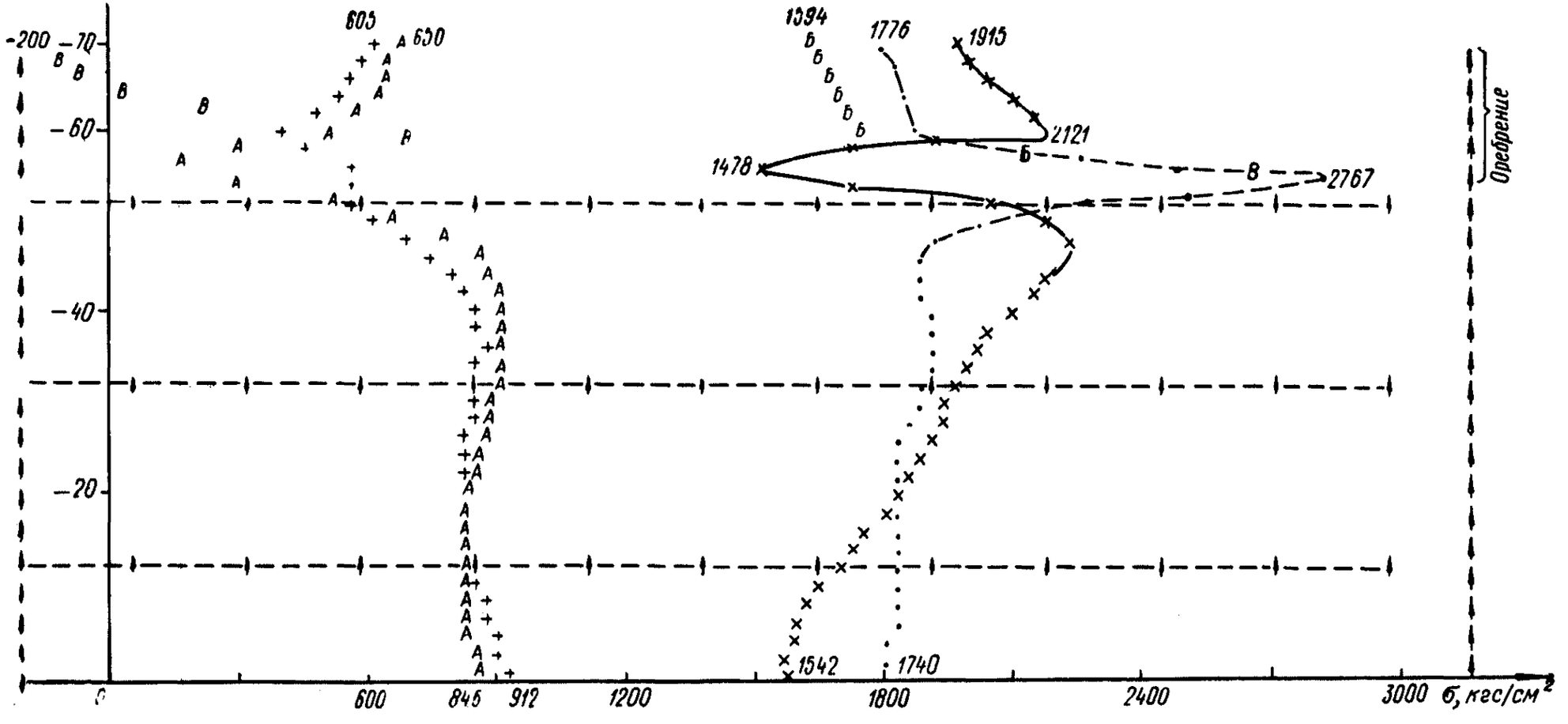
*, • — напряжения у верхнего кольца; +, Λ — напряжения у нижнего кольца

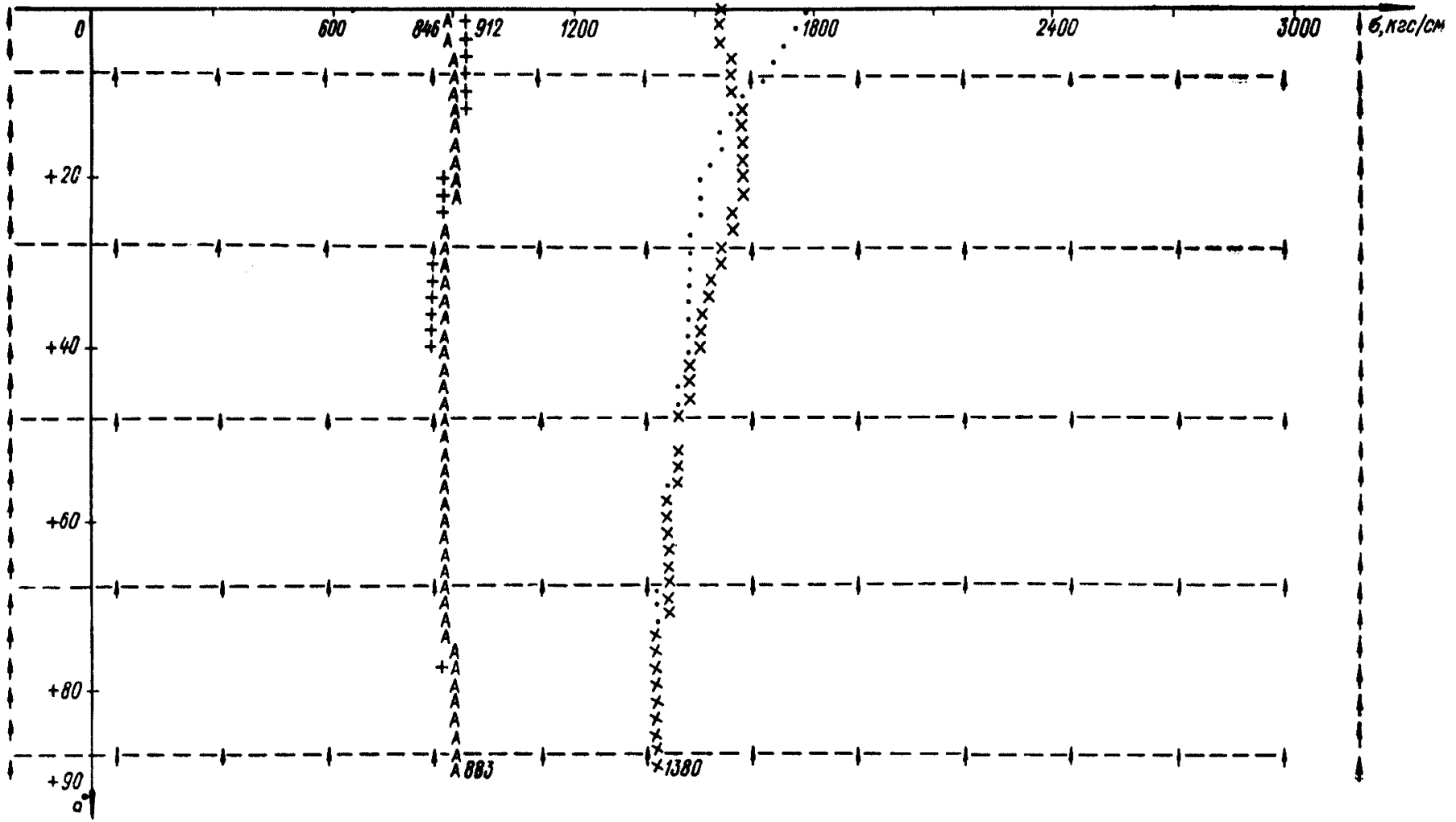
Черт. 7



Обозначения см. на черт. 7

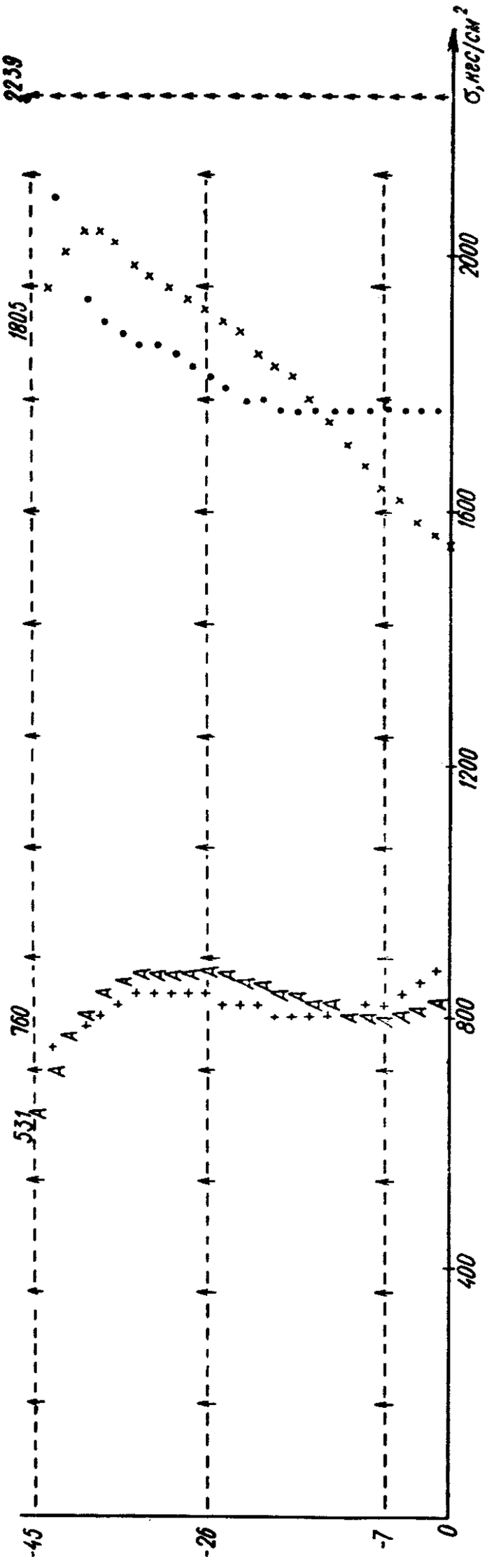
Черт. 8

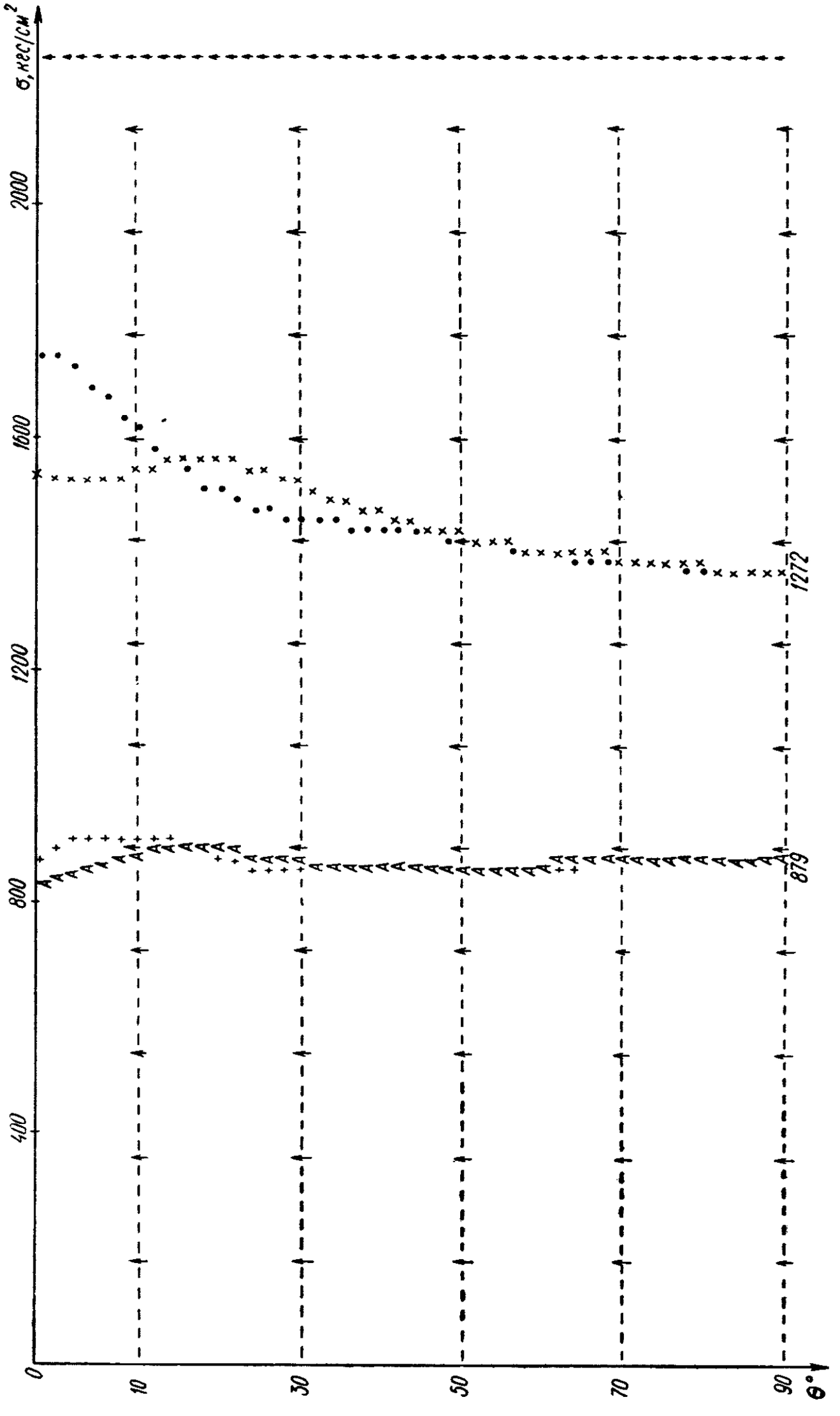

-200
-70
-60
-40
-20
605
630
1394
1776
1915
2121
1478
2767
Б
В
Ориентир
1542
1740
0
600
845
912
1200
1800
2400
3000
σ, кгс/см²



• — меридиональные напряжения на наружной поверхности оболочки; × — меридиональные напряжения на внутренней поверхности оболочки; + — окружные напряжения на наружной поверхности оболочки; *А* — окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки; *Б* — напряжения у основания ребра; *В* — напряжения на наружной поверхности ребра

Черт. 9

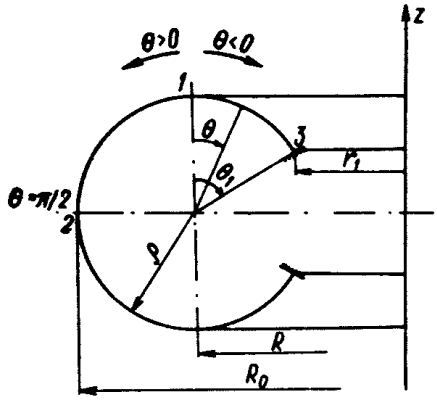

2239
1805
760
531
σ, кгс/см²
2000
1600
1200
800
400
0
-7
-26
-45

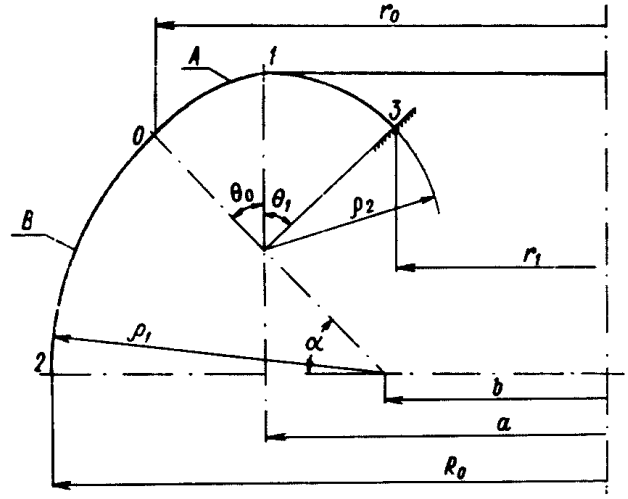


Обозначения см. на черт. 9
Черт. 10

— для круговых сечений

$$\left.\begin{aligned} T_1^{(1)} &= \rho p; \\ T_1^{(2)} &= \frac{1}{2}\left(1 + \frac{R}{R_0}\right)\rho p; \\ T_1^{(3)} &= \frac{1}{2}\left(1 + \frac{R}{r_1}\right)p\rho; \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$





Черт. 11

— для овальных сечений

$$\left.\begin{aligned} T_1^{(1)} &= p\rho_2; \\ T_1^{(2)} &= \frac{1}{2}\,p\rho_1\left(\frac{R_0 - a}{R_0 - b}\right); \\ T_1^{(3)} &= \frac{1}{2}\,p\rho_2\left(1 + \frac{a}{r_1}\right); \\ b &= R_0 - \rho_1; \quad a = b + (\rho_1 - \rho_2)\cos\alpha. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

6.2. По формулам (6) и (7) строятся графики зависимости $T=f(\theta)$ в интервале $\theta_1<\theta<\frac{\pi}{2}$.

Нанеся на графики зависимостей $T=f(\theta)$ горизонтальные прямые, соответствующие предельным значениям усилий для различных толщин, получим возможность наиболее рационально выбрать марки стали и толщину листов для каждого сечения спиральной камеры, а следовательно, для всей ее поверхности. Впоследствии это уточняется согласно технологическим требованиям.

При определении толщин листов учитывается, что в зоне сопряжения со статором и в зоне заделки в бетон будут действовать дополнительно изгибающие моменты, определяемые специальным расчетом (разд. 7).

7. РАСЧЕТ КРУГОВЫХ СЕЧЕНИЙ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

7.1. Уравнение симметрично нагруженной торообразной оболочки имеет следующий вид [1]:

$$-\frac{i}{l^3}\cdot\frac{d}{d\theta}\left(\frac{1}{1+\alpha\sin\theta}\cdot\frac{dV}{d\theta}\right)+\frac{\sin\theta}{(1-\alpha\sin\theta)^2}V=-f_0\frac{\cos\theta}{(1+\alpha\sin\theta)^2},$$

где $f_0=-il^3A+\frac{\alpha}{2}\rho p$;

l^3, α, ρ, θ — геометрические параметры тора;

A — постоянная, определяемая из условий статики;

$$\alpha=\frac{\rho}{R};\quad l^3=\sqrt{12(1-\nu^2)}\cdot\frac{\rho^2}{Rh};$$

ν — коэффициент Пуассона;

h — толщина оболочки;

θ_1 — угол места сопряжения спиральной камеры со статором.

Все усилия, моменты и перемещения оболочки выражаются через вещественную и мнимую части функции V и ее производных.

Для решения уравнения торообразной оболочки применим асимптотический метод.

7.2. Для учета влияния податливости статора на напряженное состояние спиральной камеры расчет производится при трех граничных условиях на краю $\theta=\theta_1$ (черт. 11):

— оболочка нагружена равномерным внутренним давлением p и жестко защемлена в месте сопряжения со статором;

— оболочка свободна от внешней нагрузки при заданных в месте сопряжения со статором значениях угла поворота $\vartheta=1$ и радиального перемещения $w=0$;

— оболочка свободна от внешней нагрузки при заданных в месте сопряжения со статором значениях угла поворота $\vartheta=0$ и радиального перемещения $w=1$.

На краю $\theta=\frac{\pi}{2}$ используется условие симметрии: $\vartheta=0$, $N=0$.

Напряженное состояние спиральной камеры представляет собой сумму напряженных состояний для этих трех расчетных условий при действительных значениях угла поворота и радиального перемещения верхнего пояса статора. При определении указанных перемещений не учитывается жесткость спиральной камеры.

7.3. Величины, характеризующие напряженно-деформированное состояние спиральной камеры, определяются по следующим формулам [5, 6]:

$$T_1 = -\frac{\alpha\cos\theta}{l^3\varphi^2}\operatorname{Im} V + \frac{1+\varphi}{\varphi}\cdot\frac{p\rho}{2} - \frac{\alpha+\sin\theta}{\varphi^2}\alpha A;$$

$$T_2 = \frac{\alpha\cos\theta}{l^3\varphi^2}\operatorname{Im} V - \frac{1}{l^3\varphi}\operatorname{Im}\frac{dV}{d\theta} + \frac{p\rho}{2} + \frac{\alpha+\sin\theta}{\varphi^2}\alpha A;$$

$$G_1 = \frac{\alpha\rho}{l^6}\left[(1-\mu)\frac{\alpha\cos\theta}{\varphi^2}\operatorname{Re} V - \frac{1}{\varphi}\operatorname{Re}\frac{dV}{d\theta}\right];$$

$$G_2 = \nu G_1;$$

$$N = -\frac{\alpha\sin\theta}{l^3\varphi^2}\operatorname{Im} V + \frac{\cos\theta}{\varphi^2}\alpha A;$$

$$w = \frac{\varphi R}{Eh}(T_2 - \nu T_1);$$

$$\vartheta = -\frac{1}{\alpha\varphi Eh}\operatorname{Re} V;$$

$$\Delta_z = \rho\int_{\theta_2}^{\theta_1}\vartheta\cos\theta d\theta;$$

$$\varphi = 1 + \alpha\sin\theta,$$

где T_1 и T_2 — меридиональные и тангенциальные растягивающие усилия;

G_1 и G_2 — меридиональный и тангенциальный изгибающие моменты;

N — перерезывающая сила;

w — радиальное перемещение;

ϑ — угол поворота касательной к меридиану;

Δ_z — осевое перемещение.

7.4. Изложенный алгоритм реализован в программе, составленной в кодах для ЭЦВМ «Минск-22». Исходные данные записываются на специальных бланках для каждого случая граничных условий раздельно. Количество одновременно рассчитываемых вариантов не должно быть более 25. Исходные данные для расчета задаются в табл. 5.

Таблица 5

Варианты	E, кгс/см²	ν	ρ, см	R, см	h, см	p, кгс/см²	θ_1, рад	θ_2, рад	θ_3, рад	n

В табл. 5 обозначено:

E — модуль упругости;

ν — коэффициент Пуассона;

ρ, R — радиусы тора;

h — толщина оболочки;

θ_1 — угол, соответствующий месту сопряжения спирали и статора;

p — внутреннее давление;

θ_2, θ_3 — промежуток значений угла θ, в котором строится решение;

n — число участков, на которое делится расчетный промежуток.

Значениями угла θ, в которых печатаются искомые величины, являются

$$\theta_k = \theta_2 + k\frac{\theta_3 - \theta_2}{n},$$

где $k=0, 1, 2, \ldots, n$.

Программа составлена в предположении, что $\theta_k \neq 0$.

Результаты печатаются в следующей последовательности для каждого варианта: T_1, T_2, G_1, N, ω, ϑ, G_2 (повторяется $n+1$ раз), Δ_z (повторяется $n+1$ раз).

7.5. Инструкция к программе

7.5.1. Включить ключ 100, если не нужно выводить на печать исходные данные. При выключенном ключе исходные данные печатаются.

Включить ключ 0002, если решается задача с первым граничным условием. Включить ключи 0002 и 0004, если решается задача с третьим граничным условием. При выключенных ключах 0002 и 0004 будет выполняться первое граничное условие.

7.5.2. Подключить лентопротяжный механизм НМЛ с библиотекой стандартных программ.

7.5.3. Вставить на устройство ввода перфоленту с рабочей программой.

7.5.4. Ввести программу.

7.5.5. Передать управление в ячейку 1040. Останов в ячейке 0015.

7.5.6. Передать управление в ячейку 1045, включить печать. Останов в ячейке 0047.

7.5.7. Поставить на устройство ввода перфоленту с исходными данными.

7.5.8. Включить ввод перфоленты в печать. Передать управление в ячейку 1053.

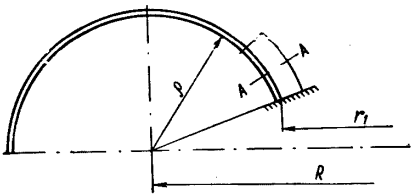
7.5.9. Останов в ячейке 1127 — конец решения.

8. РАСЧЕТ КРУГОВЫХ СЕЧЕНИЙ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ С УЧЕТОМ РЕБЕР

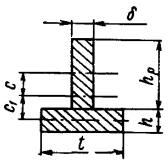
8.1. В случае, когда на краю спиральной камеры у верхнего пояса установлены ужесточающие ребра, расчет производится по разработанной на заводе схеме расчета конструктивно-ортотроп-

ных оболочек [8]. Упругие характеристики ребер равномерно распределяются по параллельному кругу оболочки, увеличивая ее жесткость в меридиональном направлении. Предполагается, что жесткость оболочки в окружном направлении не изменяется.

8.2. Геометрические характеристики:



A-A



Черт. 12

— площадь поперечного сечения ребра

$$F_р = h_р\delta,$$

где $h_р$ — высота, а δ — толщина ребра (черт. 12);

— шаг установки ребер

$$t = \frac{2\pi r_1}{n},$$

где r_1 — радиус сечения защемления спирали;

n — число ребер;

— жесткости на растяжение:

оболочки

$$B_0 = \frac{Eh}{1-\nu^2};$$

ребра

$$B_р = \frac{EF_р}{t};$$

суммарная

$$B_1 = B_0 + B_р,$$

где h — толщина оболочки;

— приведенная толщина

$$h_1 = h + \frac{F_р}{t};$$

— момент инерции ребра относительно нейтральной оси сечения оболочки с ребром

$$J_р = F_р\left[\frac{h_р^2}{12} + \frac{h^2}{h_1^2}\left(\frac{h_р + h}{2}\right)^2\right];$$

— жесткость ребра, отнесенная к единице длины параллельного круга,

$$D_р = \frac{EJ_р}{t};$$

— цилиндрическая жесткость оболочки

$$D_0 = \frac{B_0h^2}{12};$$

— жесткость оболочки с учетом смещения нейтральной оси

$$D_0' = B_0\left[\frac{h^2}{12} + \left(1 - \frac{h}{h_1}\right)^2\left(\frac{h_р + h}{2}\right)^2\right];$$

— суммарная жесткость оболочки на изгиб

$$D_1 = D_0' + D_р;$$

— приведенные величны:

$$h_2 = \frac{B_0}{B_1} h_1;$$

$$h_3 = h\sqrt{\frac{D_1 h}{D_0 h_2}};$$

— приведенный момент инерции сечения

$$J = \frac{h^3}{12} + (h_1 - h)\left[\frac{h_р^2}{12} + \frac{h}{h_1}\left(\frac{h_р + h}{2}\right)^2\right];$$

— расстояние от центра тяжести сечения ребра до нейтральной оси сечения

$$c = \frac{h}{h_1} \cdot \frac{h_р + h}{2};$$

— расстояние от срединной поверхности оболочки до нейтральной оси сечения

$$c_1 = \left(1 - \frac{h}{h_1}\right)\frac{h_р + h}{2}.$$

8.3. Усилия, моменты и напряжения

8.3.1. Меридиональное усилие и момент в сечении заделки спиральной камеры:

$$T_1 = \frac{p\rho}{2}\left(1 + \frac{R}{r_1}\right);$$

$$M_1 = -\frac{p\rho h_3}{4\lambda}\left[1 - \nu\frac{h_2}{h_1}\left(1 + \frac{R}{r_1}\right)\right],$$

где $\lambda = \sqrt{3(1 - \nu^2)} = 1{,}652$.

8.3.2. Напряжения в оболочке

$$\sigma_{об} = \frac{T_1}{h_1} + \frac{M_1}{J}\left(\frac{h}{2} + c_1\right).$$

8.3.3. Напряжения в ребре

$$\sigma_р = \frac{T_1}{h_1} - \frac{M_1}{I}\left(\frac{h_р}{2} + c\right).$$

8.3.4. Когда необходимо учесть податливость статора, подсчитывается дополнительный изгибающий момент в сечении сопряжения оболочки со статором:

$$M_{1\text{доп}} = -2\gamma_1 D_1\left(\vartheta_1 - \frac{\gamma_1 w_1}{\sin\theta_1}\right),$$

где ϑ_1 — угол поворота пояса статора;

w_1 — радиальное перемещение точки сопряжения.

Величина γ_1 подсчитывается по формуле

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{\lambda \sin\theta_1}{r_1 h_3}}.$$

8.4. Изложенный алгоритм реализован на ЭЦВМ «Наири».

Программа расчета ребристой оболочки на ЭЦВМ «Наири»

an

1. Введем *и е с b т р х о*
2. Интервал 2
3. Вычислим $х = хтр/2ил$
4. Вычислим $р = b/0{,}91$
5. Вычислим $г = р + х$
6. Вычислим $б = (т + b)/2$
7. Вычислим $л = b + х$
8. Вычислим $г = лр/г$
9. Вычислим $ш = бb/л$
10. Вычислим $у = хб/л$
11. Вычислим $s = pb^2/12$
12. Вычислим $р = s + ру^2 + х(т^2/12 + ш^2)$
13. Вычислим $р = b\sqrt{(pb/sг)}$
14. Вычислим $х = b^3/12 + х(т^2/12 + шб)$
15. Печатаем с двумя знаками *лгр*
16. Печатаем с двумя знаками *ш у*
17. Вычислим $у = х/(b/2 + у)$
18. Вычислим $ш = х/(т/2 + ш)$
19. Печатаем с двумя знаками *х у ш*
20. Интервал 2
21. Вычислим $о = ос/2$
22. Вычислим $е = (е + и)/и$
23. Вычислим $b = ое$
24. Допустим $т = 1{,}652$
25. Вычислим $м = (ор/2т)\,(0{,}3ег/л - 1)$
26. Вычислим $g = b/л + м/у$
27. Вычислим $н = b/л - м/ш$
28. Печатаем с двумя знаками *bм*
29. Интервал 1
30. Печатаем с двумя знаками *g н*
31. Интервал 4
32. Идти к 1

Исполним 1

8.5. Обозначения:

Величина	Индекс в *ап*	Величина	Индекс в *ап*	Величина	Индекс в *ап*
r	*и*	B_0	*р*	I	*х*
R	*е*	B_1	*г*	$W_{об}$	*у*
ρ	*с*	$h_{ср}$	*б*	$W_р$	*ш*
h	*b*	h_1	*л*	$\frac{p\rho}{2}$	*о*
$h_р$	*т*	h_2	*б*		
δ	*р*	c	*ш*	$\frac{r_0+r_1}{r_1}$	*е*
n	*х*	c_1	*у*	T_1	*b*
p	*о*	D_0	*s*	M_1	*м*
$B_р$	*х*	D_1	*р*	$\sigma_{об}$	*д*
		h_3	*р*	$\sigma_р$	*н*

8.6. Порядок расчета

Вводим r_1 *Roh*$h_р$*δnp*.

Печатаем h_1 h_2 h_3;

c, c_1;

I, $W_{об}$, $W_р$;

T_1, M_1;

$\sigma_{об}$, $\sigma_р$.

9. РАСЧЕТ ОВАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

9.1. Каждое сечение представляется в виде двух сопряженных торообразных оболочек. Напряжения определяются в сечении заделки оболочки A и в зоне сопряжения двух оболочек, где возникает краевой эффект вследствие скачкообразного изменения радиуса кривизны меридиана оболочки. Методика расчета изложена в работе [7].

9.2. Усилия и моменты в сечении защемления оболочки:

$$T_1 = \frac{p\rho_2}{2}\left(1 + \frac{a}{r_1}\right);$$

$$T_2 = \frac{p\rho_2}{2};$$

$$M_1 = \frac{p\rho_2 h}{4\lambda}\left[1 - \nu\left(1 + \frac{a}{r_1}\right) - \frac{a\cos\theta_1}{\gamma_1 r_1^2}\right];$$

$$M_2 = \nu M_1,$$

где p — давление, *кгс/см*^{2};

h — толщина оболочки, *см*;

θ_1 — угол, характеризующий сечение заделки (черт. 11);

$\lambda = 1{,}652;$

$\nu = 0{,}3;$

$\gamma_1 = \sqrt{\frac{\lambda \sin\theta_1}{r_1 h}}.$

Размеры a, r_1 и ρ_2 указаны на черт. 11.

9.3. Усилия и моменты в сечении сопряжения оболочек.

Безмоментные усилия:

— для оболочки A

$$\tilde{T}_1^A = \frac{p\rho_2}{2}\left(1 + \frac{a}{r_0}\right);$$

$$\tilde{T}_2^A = \frac{p\rho_2}{2};$$

— для оболочки B

$$\tilde{T}_1^B = \tilde{T}_1^A;$$

$$\tilde{T}_2^B = \frac{p\rho_2}{2}\left(1 + \frac{r_0 + a}{r_0 - a} \cdot \frac{a - b}{r_0 - b}\right).$$

Усилия с учетом краевого эффекта:

$$T_1 = \tilde{T}_1^A;$$

$$T_2 = \frac{1}{2}(\tilde{T}_2^A + \tilde{T}_2^B);$$

$$M_1 = 0{,}049(\tilde{T}_2^B - \tilde{T}_2^A);$$

$$M_2 = \nu M_1.$$

Максимальный изгибающий момент M_1 определяется в сечении оболочки, отстоящем от сечения сопряжения оболочек на расстоянии

$$s = \frac{\pi}{4\gamma_0},$$

где $\gamma_0 = \sqrt{\frac{\lambda \sin\theta_0}{r_0 h}}$;

θ_0 — угол, характеризующий сечение сопряжения оболочек.

Расчет имеет смысл только при соблюдении условия

$$s < s^*,$$

где s^* — расстояние от сечения сопряжения оболочек до вертикальной оси овального сечения.

9.4. Напряжения вычисляются по известным формулам:

$$\sigma_1 = \frac{T_1}{h} \pm \frac{6M_1}{h^2};$$

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{h} \pm \frac{6M_2}{h^2}.$$

9.5. Изложенный алгоритм реализован на ЭЦВМ «Наири».

Программа расчета овальных сечений на ЭЦВМ «Наири»

an

1. Введем *и е о т р х с*
2. Интервал 2
3. Вычислим $и = и - е$
4. Вычислим $s = \cos(\pi m/180)$
5. Вычислим $а = и + (е - о)s$
6. Вычислим $ы = (а - р)/о$
7. Вычислим $у = \sqrt{(1 - ы^2)}$
8. Вычислим $r = и + es$
9. Вычислим $с = со/2$
10. Вычислим $л = (а + р)/р$
11. Допустим $g = 1{,}652$
12. Вычислим $\delta = \sqrt{(gы/рх)}$
13. Вычислим $м = (сх/2g)(1 - 0{,}3л - ау/\delta р^2)$
14. Вычислим $ш = лс/х + 6м/х^2$
15. Вычислим $м = с/х + 1{,}8м/х^2$
16. Печатаем с двумя знаками *ш м*
17. Интервал 2
18. Вычислим $г = с(1 + (r + а)(а - и)/((r - а)(r - и)))$
19. Вычислим $м = 0{,}049х(г - с)$
20. Вычислим $ш = с(r + а)/rх + 6м/х^2$
21. Вычислим $м = (с + г)/2х + 1{,}8м/х^2$
22. Вычислим $\delta = \sqrt{(gs/rх)}$
23. Вычислим $s = \pi/4\delta$
24. Печатаем с двумя знаками *ш м s*
25. Интервал 4
26. Идти к 1

Исполним 1

9.6. Обозначения:

Величина	Индекс	Величина	Индекс
R_0, *см*	*и*	$\cos\theta_1$	*у*
ρ_1, *см*	*е*	r_0, *см*	*r*
ρ_2, *см*	*о*	T_2, *кгс/см*	*с*
α^0, *град*	*т*	λ	*g*
r_1, *см*	*р*	γ_1	δ
h, *см*	*х*	M_1, *кгс·см/см*	*м*
p, *кгс/см²*	*с*	σ_1, *кгс/см²*	*ш*
b, *см*	*и*	σ_2, *кгс/см²*	*м*
$\cos\alpha$	*s*	T_2^B, *кгс/см*	*г*
a, *см*	*а*	γ_0	δ
$\sin\theta_1$	*ы*	*s*, *см*	*s*

9.7. Порядок расчета

Вводим R_0, ρ_1, ρ_2, α^0, r_1, *h*, *p*.

Печатаем σ_1, σ_2 в сечении заделки, σ_1', σ_2' — в сечении сопряжения, *s*.

10. КОЭФФИЦИЕНТ ЦИКЛИЧНОСТИ

10.1. Коэффициент цикличности характеризует превышение напряжения в спиральной камере у колонн статора под напряжениями, определяемыми при расчете оболочки спиральной камеры по осесимметричной расчетной схеме.

На основании экспериментальных данных для турбин на напоры $H \simeq 100$ *м* принимаем $K=1{,}7$.

Для турбин на напоры $H=200$ *м* $K=1{,}4$.

Для турбин на напоры $H=300$ *м* $K=1{,}25$.

11. РАСЧЕТ СТАТОРА, НЕ ПОДКРЕПЛЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНОМ, НА НЕСИММЕТРИЧНУЮ НАГРУЗКУ

11.1. В качестве расчетной схемы принимается упругая стержневая система в виде замкнутого кругового кольца.

Колонны статора считаются жестко заделанными по нижнему поясу в недеформируемое основание. Присоединение колонн к поясу эксцентричное. Эксцентриситет присоединения k-той колонны к поясу равен e_k. Стык колонн с поясом считается абсолютно жестким, т. е. горизонтальная вставка длиной e_k и верхний участок колонн длиной h_0 имеют бесконечно большие моменты инерции.

11.2. Задача решается методом сил. Система канонических уравнений метода сил записывается следующим образом:

$$\sum_{l=1}^{n_k} \delta_{k_i l_j} x_{l_j} + \Delta_{ki} = 0 \quad (k = 1, 2, \ldots, n_к; \quad i, j = 1, \ldots,), \qquad (6)$$

где $\delta_{k_i l_j}$ — перемещения в i-том направлении k-той группы от единичного неизвестного j-того направления l-той группы;

Δ_{ki} — то же, от совокупности внешних факторов.

Коэффициенты перед неизвестными и свободные члены уравнений вычисляются по формуле Мора путем перемножения соответствующих эпюр внутренних усилий от единичных неизвестных и от внешней нагрузки.

Разработанный алгоритм реализован на ЭЦВМ «М-220» с использованием транслятора ТА-1М.

11.3. Исходные данные для расчета задаются в виде массивов $\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$, $\mathbf{M}_3$, **T**, **V**, **W**.

Массив $\mathbf{M}_1$ включает величины $n_к$, $R_п$, H, h_0, β, J_1, J_2, J_3, J_4.

Здесь $n_к$ — количество колонн;

$R_п$ — расстояние от оси статора до оси пояса;

H — высота колонны;

h_0 — расстояние от центра тяжести участка пояса до нижней кромки сечения;

β — угол между верхними осями и главной осью момента инерции и колонны;

J_1, J_2 — главные моменты инерции верхнего пояса;

J_3 — геометрический фактор крутильной жесткости пояса;

J_4 — площадь верхнего кольца.

Массив $\mathbf{M}_2$ состоит из семи компонентов для каждой колонны и включает величины α_k, e_k, θ_k, J_1, J_2, J_3, J_4.

Здесь α_k — угол в плане, который занимает k-тый участок пояса;

e_k — эксцентриситет между центром тяжести k-той колонны и центрами тяжести k-того участка пояса;

θ_k — угол между главными центральными осями инерции k-той колонны и осью W;

J_1, J_2, J_3, J_4 — соответственно моменты инерции, фактор крутильной жесткости и площадь k-той колонны.

Массив **T** включает координаты точек в главных осях для определения нормальных напряжений в сечениях пояса. Массивы **V** и **W** включают координаты точек для определения нормальных напряжений в колоннах.

11.4. В качестве нагрузок принимаются нагрузки, действующие на поясе, отнесенные к его геометрической оси.

Вертикальные, горизонтальные нагрузки и скручивающие моменты распределяются равномерно в пределах каждого k-того участка пояса и ступенчато по длине всего пояса. Тангенциальные усилия T_k представлены в виде сосредоточенных сил, приложенных к узлам.

Нагрузка на колонну от взаимодействия ее с водяным потоком считается равномерной по высоте колонны и действует под углом λ_k к меридиональной плоскости, проведенной через ось колонны. Нагрузки формируются массивом $\mathbf{M}_3$, который состоит для каждого участка пояса из шести компонентов внешней нагрузки: q_{1k}, q_{2k}, q_{3k}, q_{4k}, q_{5k} и λ_k.

Здесь q_{1k} — радиальная распределенная нагрузка на k-том участке;

q_{2k} — вертикальная распределенная нагрузка на k-том участке;

q_{3k} — скручивающий распределенный момент на k-том участке;

q_{4k} — тангенциальная сосредоточенная нагрузка на k-том участке;

q_{5k} — распределенная нагрузка на k-той колонне;

λ_k — угол между линией действия силы q_{5k} и радиусом, проходящим через центр тяжести колонны.

11.5. После выполнения расчета производится вывод на печать результатов, необходимых для проектирования статора:

а) внутренних усилий — изгибающих и крутящих моментов поперечных и продольных сил в трех сечениях каждого участка верхнего пояса и каждой колонны;

б) изгибающих моментов, отнесенных к главным центральным осям инерции тех же сечений;

в) деформационных (кинематических) проверок решений;

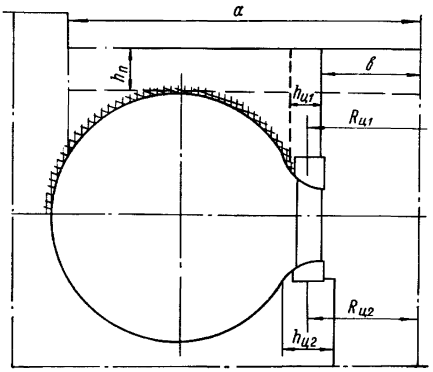
г) перемещений узловых точек на поясе статора;

д) нормальных напряжений в шести точках каждого сечения на всех участках пояса и в колоннах.

12. РАСЧЕТ ЗАБЕТОНИРОВАННОГО СТАТОРА

12.1. Принимается расчетная схема, в которой бетон, расположенный выше спиральной камеры, рассматривается как некоторая цилиндрическая оболочка, которая воспринимает радиальные усилия и моменты, и пластина, воспринимающая осевую нагрузку.

Бетон, примыкающий к нижнему поясу, представляется как цилиндр, нагруженный наружным давлением (черт. 13).



Черт. 13

Верхний и нижний пояса и колонны рассматриваются соответственно как кольцевые и прямые стержни.

12.2. Усилия и моменты взаимодействия бетона, поясов и колонны определяются из условий неразрывности системы, которые могут быть сформулированы в следующем виде:

а) равенство углов поворота бетонного цилиндра и верхнего пояса статора:

$$\varphi_б' + \varphi_1 = 0;$$

б) равенство радиальных перемещений бетонного цилиндра и верхней полки верхнего пояса статора:

$$\Delta_б'' + \Delta_1' = 0;$$

в) равенство углов поворота верхнего пояса и колонны:

$$\varphi_1 + \varphi_к = 0;$$

г) равенство радиального перемещения нижней полки верхнего пояса и колонны:

$$\Delta_1'' + \Delta_к = 0;$$

д) равенство углов поворота нижнего пояса и бетонного цилиндра:

$$\varphi_2 + \varphi_б'' = 0;$$

е) равенство радиальных перемещений нижнего пояса и бетонного цилиндра:

$$\Delta_2 + \Delta_б'' = 0;$$

ж) равенство удлинения колонны и прогиба бетонной плиты:

$$\Delta l + w_б = 0.$$

Приведенные условия дают семь уравнений, в которых содержится семь неизвестных величин: три момента x_1, x_3, x_7, три пере-

резывающие силы x_2, x_4, x_6 и вертикальное усилие x_5 (черт. 14).

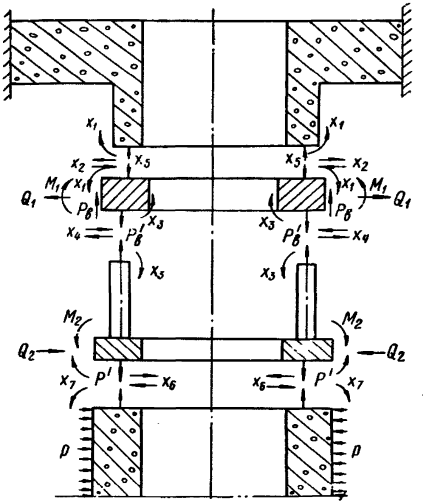
12.3. Усилия и моменты, действующие на верхний и нижний пояса, определяются по методике, изложенной в работе [8]. Схема действия внешних сил и все обозначения приведены на черт. 14. Раскрытие статической неопределимости производится методом сил. Алгоритм реализован на ЭЦВМ «М-220».

12.4. После выполнения расчета выводятся на печать следующие результаты:

а) значения неизвестных усилий и моментов;

б) напряжения в верхнем и нижнем поясах;

в) напряжения в сечении колонны (в шести точках) в местах сопряжения колонны с верхним и нижним поясами.



Черт. 14

13. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

13.1. Исходные данные для неоребренной оболочки (круглые сечения): теоретический чертеж спиральной камеры (ЛМЗ, Ау-2110644), чертеж спиральной камеры (ЛМЗ, А-2110645), максимальное давление в спиральной камере при гидроударе $p=7{,}15$ *кгс/см*^{2}, максимальное давление в спиральной камере при испытаниях $p=9{,}4$ *кгс/см*^{2}.

13.2. Для приближенного выбора толщин и марок материалов рассчитываются усилия в сечениях спиральной камеры по табл. 6. По полученным значениям усилий выбираются материалы (черт. 15).

13.3. Для расчета на ЭЦВМ круглых сечений задаются исходные данные по табл. 7.

Результаты расчета для защемленной оболочки приведены в табл. 8.

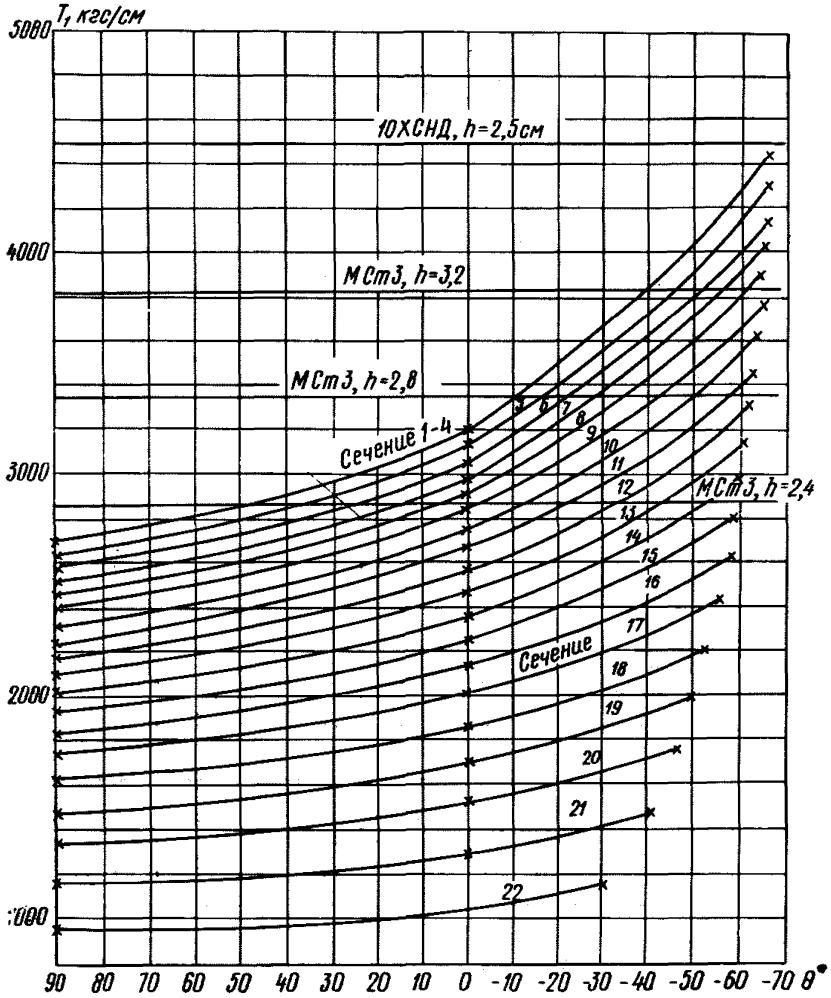
Результаты расчета изгибающего момента в месте сопряжения спиральной камеры со статором с учетом податливости статора приведены в табл. 9.

Напряжения в оболочке спиральной камеры в месте сопряжения с верхним кольцом статора приведены в табл. 10.

13.4. Для расчета ребристой оболочки исходные данные приведены в табл. 11. Результаты расчета приведены в табл. 12.

Таблица 6

Номер сечения	ρ	R_0	R	$\frac{R}{R_0}$	$\frac{1}{2}\left(1+\frac{R}{R_0}\right)$	T_2	T_1	r_1, *см*	$\frac{R}{r_1}$	$\frac{1}{2}\left(1+\frac{R}{r_1}\right)$	T_3, *кгс/см*	θ_3
	см					*кгс/см*						
1—4	420,0	1313,8	893,8	0,680	0,840	2697	3213	507,4	1,762	1,380	4437	67°
5	410,5	1293,9	883,4	0,683	0,841	2642	3140	507,1	1,742	1,371	4305	66
6	400,4	1272,8	872,4	0,685	0,842	2580	3063	506,7	1,722	1,361	4168	66
7	390,3	1251,6	861,3	0,688	0,844	2520	2986	506,4	1,700	1,350	4031	66
8	380,3	1230,5	850,2	0,691	0,845	2460	2909	506,0	1,680	1,340	3898	65
9	369,7	1208,2	838,5	0,694	0,847	2315	2828	505,6	1,658	1,329	3758	65
10	358,6	1184,8	826,2	0,697	0,848	2327	2743	505,1	1,636	1,318	3615	64
11	346,5	1159,1	812,6	0,701	0,850	2254	2650	504,5	1,610	1,305	3458	63
12	334,4	1133,3	798,9	0,705	0,852	2180	2558	503,8	1,586	1,293	3307	62
13	321,2	1105,2	784,0	0,709	0,854	2099	2457	503,1	1,558	1,279	3142	61
14	307,7	1076,0	768,3	0,714	0,857	2017	2354	502,2	1,530	1,265	2978	60
15	293,3	1045,0	751,7	0,719	0,860	1929	2244	501,1	1,500	1,250	2805	59
16	278,2	1012,0	733,8	0,725	0,862	1835	2128	499,9	1,468	1,234	2626	58
17	261,5	975,2	713,7	0,732	0,866	1732	2000	498,3	1,432	1,216	2432	56
18	242,4	932,7	690,3	0,740	0,870	1613	1854	496,1	1,391	1,196	2216	53
19	221,8	885,8	664,0	0,750	0,875	1485	1697	493,2	1,346	1,173	1990	50
20	199,7	834,3	634,6	0,760	0,880	1345	1528	489,2	1,297	1,148	1755	47
21	171,4	765,0	593,6	0,776	0,888	1164	1311	481,9	1,232	1,116	1463	41
22	138,3	675,1	536,8	0,795	0,898	950	1058	467,5	1,148	1,074	1136	30


T, кгс/см
5000
4000
3000
2000
1000
10ХСНД, h=2,5см
МСт3, h=3,2
МСт3, h=2,8
МСт3, h=2,4
Сечение 1-4
Сечение
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
90 80 70 60 50 40 30 20 10 0 -10 -20 -30 -40 -50 -60 -70 θ°

Черт. 15

Таблица 7

Номер сечения	$E \cdot 10^6$, *кгс/см²*	ν	ρ, *см*	R, *см*	h, *см*	p, *кгс/см²*	θ_1, *рад*	θ_2, *рад*	θ_3, *рад*	n
1—4	2,1	0,3	420,0	893,8	3,2	7,65	—1,260	—1,260	1,571	15
5	2,1	0,3	410,5	883,4	3,2	7,65	—1,249	—1,249	1,571	15
6	2,1	0,3	400,4	872,4	3,2	7,65	—1,238	—1,238	1,571	15
7	2,1	0,3	390,3	861,3	3,2	7,65	—1,226	—1,226	1,571	15
8	2,1	0,3	380,3	850,2	3,2	7,65	—1,213	—1,213	1,571	15
9	2,1	0,3	369,7	838,5	3,2	7,65	—1,199	—1,199	1,571	15
10	2,1	0,3	358,6	826,2	3,2	7,65	—1,184	—1,184	1,571	15
11	2,1	0,3	346,5	812,6	2,8	7,65	—1,167	—1,167	1,571	15
12	2,1	0,3	334,4	798,9	2,8	7,65	—1,148	—1,148	1,571	15
13	2,1	0,3	321,2	784,0	2,8	7,65	—1,125	—1,125	1,571	15
14	2,1	0,3	307,7	768,3	2,4	7,65	—1,100	—1,100	1,571	15
15	2,1	0,3	293,3	751,7	2,4	7,65	—1,073	—1,073	1,571	15
16	2,1	0,3	278,2	733,8	2,4	7,65	—1,039	—1,039	1,571	15
17	2,1	0,3	261,5	713,7	2,4	7,65	—0,998	—0,998	1,571	15
18	2,1	0,3	242,4	690,3	2,4	7,65	—0,944	—0,944	1,571	15
19	2,1	0,3	221,8	664,0	2,4	7,65	—0,873	—0,873	1,571	15
20	2,1	0,3	199,7	634,6	2,4	7,65	—0,781	—0,781	1,571	15
21	2,1	0,3	171,4	593,6	2,4	7,65	—0,620	—0,620	1,571	15
22	2,1	0,3	138,3	536,8	2,4	7,65	—0,315	—0,315	1,571	15

Таблица 8

Номер сечения	T_1, кгс/см	T_2, кгс/см	G_1, кгс·см/см	G_2, кгс·см/см	h, см	$\sigma_р$, кгс/см²	σ_{p_2}, кгс/см²	$\sigma_{изг1}$, кгс/см²	$\sigma_{изг2}$, кгс/см²	$\Sigma\sigma_1$, кгс/см²	$\Sigma\sigma_2$, кгс/см²
1—4	4518	1355	181	55	3,2	1412	425	106	32	1518	457
5	4383	1315	185	56	3,2	1370	410	108	32	1478	452
6	4241	1272	190	57	3,2	1338	398	109	33	1447	430
7	4100	1230	193	58	3,2	1280	385	113	34	1393	420
8	3964	1190	196	59	3,2	1240	370	115	35	1355	405
9	3820	1146	199	60	3,2	1195	358	117	35	1312	393
10	3671	1100	201	60	3,2	1147	345	118	35	1265	380
11	3511	1053	182	55	2,8	1254	376	139	42	1393	1337
12	3354	1010	183	55	2,8	1198	360	139	42	1337	402
13	3184	955	184	55	2,8	1137	340	140	42	1277	382
14	3014	904	161	48	2,4	1255	377	167	50	1422	427
15	2835	850	160	48	2,4	1181	355	166	50	1347	405
16	2600	780	155	46	2,4	1083	325	161	48	1244	373
17	2467	740	155	45	2,4	1030	308	161	47	1190	355
18	2230	670	150	48	2,4	929	279	156	48	1085	327
19	1998	600	152	45	2,4	832	250	158	47	990	300
20	1775	526	137	41	2,4	731	219	142	43	873	260
21	1454	436	107	32	2,4	606	182	111	33	720	215
22	1127	338	96	28	2,4	469	141	100	29	600	170

Таблица 9

Номер сечения	$G_1' \cdot 10^3$ при $\vartheta=1$ *рад*	$\vartheta \cdot 10^{-3}$, *рад*	G_1^{ϑ}, *кгс·см/см*	G_1'' при $\omega=1$ *см*	ω, *см*	G_1^{ω}	G_1^{p}	ΣG
						кгс·см/см		
1—4	—395,0	—0,43	170	—13120	0,065	—853	181	—502
5	—394,5	—0,43	170	—13119	0,065	—853	185	—498
6	—394,0	—0,43	169	—13119	0,065	—853	190	—494
7	—393,0	—0,43	169	—13120	0,065	—853	193	—491
8	—392,0	—0,43	169	—13120	0,065	—853	196	—488
9	—391,0	—0,43	168	—13120	0,065	—863	199	—486
10	—389,0	—0,43	167	—13121	0,065	—853	201	—485
11	—278,0	—0,43	120	—10053	0,065	—654	182	—352
12	—277,0	—0,43	119	—10056	0,065	—654	183	—352
13	—275,0	—0,43	118	—10054	0,065	—653	184	—351
14	—186,0	—0,43	80	—7394	0,065	—481	161	—240
15	—184,5	—0,43	79	—7399	0,065	—480	160	—240
16	—182,0	—0,43	78	—7388	0,065	—480	155	—247
17	—180,0	—0,43	77	—7418	0,065	—482	155	—250
18	—178,0	—0,43	77	—7653	0,065	—497	150	—270
19	172,0	—0,43	74	—7497	0,065	—487	152	—261
20	160,4	—0,43	69	—7530	0,065	—489	137	—283
21	159,7	—0,43	69	—7293	0,065	—774	107	—289
22	53,5	—0,43	23	—6437	0,065	—418	96	—299

Примечание. Перемещения оболочки задаются из расчета статора. G_1', G_1'' — изгибающие моменты при единичном угле поворота и единичном радиальном перемещении соответственно: G_1^{ϑ}, G_1^{ω}, G_1^{p} — изгибающие моменты при действительном угле поворота статора, радиальном перемещении и давлении соответственно.

Таблица 10

Номер сечения	T_1, *кгс/см*	$\sigma_р$, *кгс/см²*	G, *кгс·см/см*	$\sigma_{изг1}$	σ_Σ	$\sigma_{макс}=k\sigma_\Sigma$
				кгс/см²		
1—4	4518	1412	502	294	1706	2900
5	4383	1370	498	292	1662	2820
6	4241	1338	494	289	1627	2760
7	4100	1280	491	288	1568	2660
8	3964	1240	488	286	1526	2600
9	3820	1195	486	285	1480	2500
10	3671	1147	485	284	1431	2420
11	3511	1254	352	269	1523	2580
12	3354	1198	352	269	1468	2500
13	3184	1137	351	268	1405	2380
14	3014	1255	240	250	1506	2550
15	2835	1181	240	250	1431	2420
16	2600	1083	247	257	1340	2280
17	2467	1030	250	260	1290	2180
18	2230	929	270	281	1210	2060
19	1998	832	261	271	1103	1870
20	1755	731	283	294	1025	1740
21	1454	606	289	300	906	1540
22	1127	469	299	311	780	1320

Таблица 11

Размеры в *см*

r_1	r_0	ρ	h	$h_р$	δ	n	p, *кгс/см²*
434	656,1	256,1	3,5	30	3,2	60	23

Таблица 12

см

h_1	h_2	h_3	c	c_1	J, *см³*	$W_{об}$, *см²*	$W_р$, *см²*	T_1, *кгс/см*	M_1, *кгс·см/см*	$\sigma_{об}$, *кгс/см²*	$\sigma_р$, *кгс/см²*
5,61	3,62	40,55	10,45	6,30	531,6	66,0	20,9	7397	—18570	1037	2210

13.5. Исходные данные и результаты расчета овальных сечений приведены в табл. 13.

Таблица 13

Номер сечения	Исходные данные							Напряжение, *кгс/см²*				Расстояние от точки сопряжения s, *см*
								Сечение заделки		Сечение сопряжения		
	R, *см*	ρ_1, *см*	ρ_2, *см*	α, *град*	r_1, *см*	δ, *см*	p, *кгс/см²*	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	
15	230,1	40,7	36,4	55	163	3,6	45	600	260	570	500	22,3

14. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СТАТОРОВ

14.1. Исходные данные для расчета незабетонированного статора на несимметричную нагрузку приводятся в табл. 14, 15, 16, 17, обозначения — в разд. 11. Сечения верхнего пояса и колонн приведены на черт. 16.

Таблица 14

$h_к$	$R_п$, *см*	H, *см*	h_0, *см*	β, *град*	I_1, *см*^{4}	I_2, *см*^{4}	I_3, *см*^{4}	I_4, *см*^{2}
24	451,43	236	57,6	43	$1{,}48 \cdot 10^6$	$1{,}43 \cdot 10^6$	$1{,}73 \cdot 10^6$	1510,7

Таблица 15

Номер колонны k	q_{1k}, *кгс/см*	q_{2k}, *кгс/см*	q_{3k}, *кгс·см/см*	q_{4k}, *кгс*	q_{5k}, *кгс/см*	λ_k
1	1661	6522	291 400	0	0	0
2	1661	6522	291 400	0	0	0
3	1661	6522	291 400	0	0	0
4	1661	6522	291 400	0	0	0
5	1661	6522	291 400	0	0	0
6	1652	6324	282 000	0	0	0
7	1666	6126	273 000	0	0	0
8	1675	5929	264 000	0	0	0
9	1683	5731	254 900	0	0	0
10	1664	5523	244 600	0	0	0
11	1670	5315	234 700	0	0	0
12	1660	5076	224 000	0	0	0
13	1644	4847	212 600	0	0	0
14	1640	4608	201 900	0	0	0
15	1636	4348	189 700	0	0	0
16	1533	4088	175 800	0	0	0
17	1597	3807	163 900	0	0	0
18	1578	3506	149 500	0	0	0
19	1543	3162	132 900	0	0	0
20	1511	2798	115 400	0	0	0
21	1458	2403	96 100	0	0	0
22	1354	1873	69 700	0	0	0
23	1171	1202	35 500	0	0	0
24	1100	600	5 500	0	0	0

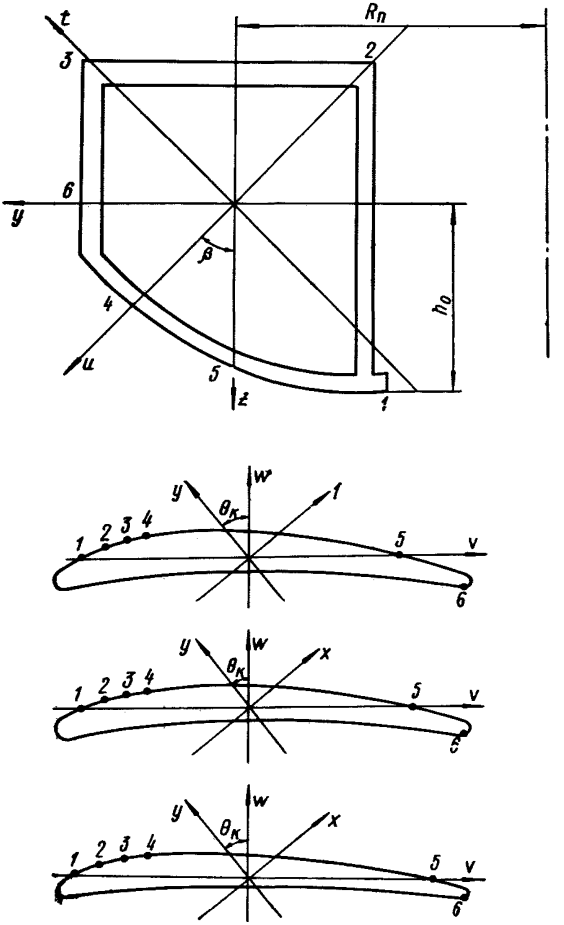
Таблица 16

Массив	Группа колонны	α_k, *град*	$e=R_п-r_k$, *см*	θ_k, *град*	$J_{1k}=J_{v,k}$	$J_{2k}=J_{w,k}$	$J_{3k}=J_{z,k}$	$J_{4k}=F_k$, *см*
					см^4			
M_2	*A*	15	—12,57	40	11 757	793 394	29 169	981,3
	B	15	—12,07	40	9 550	727 855	24 976	923,0
	C	15	—11,57	40	6 346	665 432	18 128	832,7

Таблица 17

см

Номер точки	Верхний пояс		*A*		*B*		*C*	
	Массив *T*		К массивам *V* и *W*					
	t	*u*	*v*	*w*	*v*	*w*	*v*	*w*
1	—67	15	—45	0	—45	0	—46	0
2	5	—50	—40	2	—39	2	—40	2
3	58	9	—35	4	—34	3,5	—35	3
4	20	45	—30	5	—28	4,5	—29	4
5	—22	43	40	0	43	0	50	0
6	34	28	61,9	—7,97	61,5	—7,33	61,1	—5,78



Черт. 16

14.2. В результате расчета определены напряжения в трех сечениях трех групп колонн и в 72 сечениях верхнего пояса. В табл. 18 приведены напряжения в первой группе колонн, а в табл. 19 против этой группы колонн — напряжения в поясе.

Таблица 18

Номер колонны	Номер сечения	Координаты точек, *см*					
		$v=-45$; $w=0$	$v=-40$; $w=2$	$v=-35$; $w=4$	$v=-30$; $w=5$	$v=40$; $w=0$	$v=61{,}9$; $w=-7{,}97$
	1	1730	2028	2325	2419	—130	—2230
1	2	1604	1566	1528	1461	—184	—666
	3	1477	1104	730	503	94	900
	1	1933	2237	2540	2630	—197	—2450
2	2	1760	1713	1667	1590	—43	—748
	3	1587	1190	794	552	110	962
	1	1940	2265	2590	2690	—203	—2556
3	2	1800	1752	1700	1620	—81	—812
	3	1664	1240	815	556	40	931
	1	1920	2268	2616	2728	—200	—2632
4	2	1813	1760	1710	1630	—105	—848
	3	1710	1256	807	530	—10	936
	1	1890	2254	2620	2740	—200	—2690
5	2	1798	1746	1695	1610	—121	—862
	3	1710	1240	770	485	—40	964
	1	1832	2210	2592	2722	—200	—2715
6	2	1756	1700	1654	1573	—132	—860
	3	1679	1198	717	425	—64	994
	1	1772	2162	2551	2688	—196	—2718
7	2	1700	1654	1605	1526	—134	—844
	3	1633	1146	658	364	—72	1030
	1	1726	2121	2517	2658	—181	—2698
8	2	1657	1610	1562	1487	—120	—809
	3	1588	1098	608	315	—59	1080

Таблица 19

Номер колонны	Номер сечения	Координаты точек, *см*					
		$t=-67$; $u=15$	$t=-5$; $u=-50$	$t=58$; $u=9$	$t=20$; $u=45$	$t=22$; $u=43$	$t=34$; $u=28$
1	1	1428	—214	—156	730	682	359
	2	1184	—53	—10	658	621	378
	3	1931	—545	—458	879	806	319
2	1	1436	—212	—170	719	670	348
	2	1307	—135	—88	690	648	364
	3	2167	—711	—600	953	869	302
3	1	1585	—320	—270	760	705	330
	2	1408	—228	—154	730	682	360
	3	2220	—785	—634	989	900	308
4	1	1650	—398	—302	804	744	340
	2	1430	—279	—160	764	714	375
	3	2200	—808	—615	1011	923	328
5	1	1650	—434	—240	838	777	363
	2	1413	—297	—138	787	736	396
	3	2164	—800	—583	1023	936	347
6	1	1632	—444	—265	857	707	384
	2	1396	—303	—117	802	752	413
	3	2118	—790	—547	1025	940	362
7	1	1610	—440	—240	869	809	400
	2	1379	—299	—98	810	761	425
	3	2078	—762	—516	1020	937	372
8	1	1590	—427	—220	870	812	410
	2	1370	—285	—87	809	760	429
	3	2050	—729	—496	1006	925	373

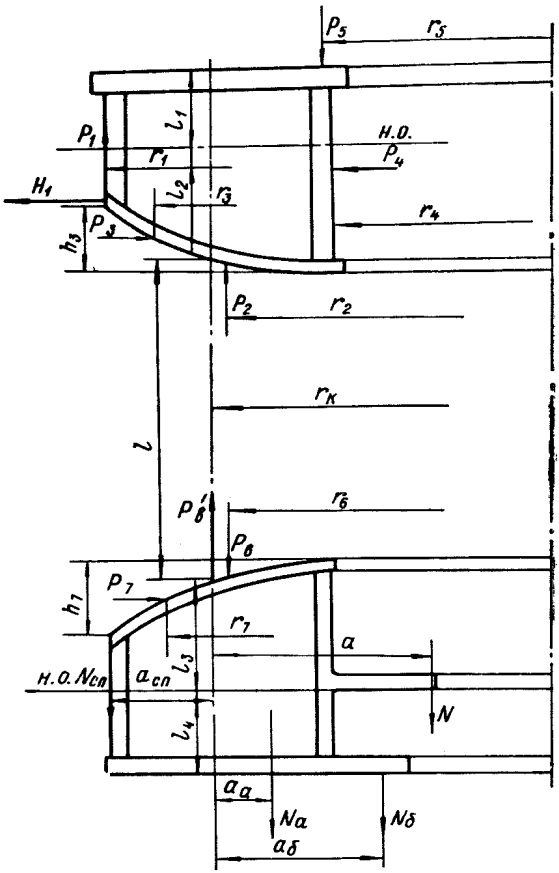
14.3 Исходные данные для расчета забетонированного статора сведены в табл. 20. Обозначения даны на черт. 17.

14.4. Результаты расчета приведены в табл. 21, 22.

Таблица 20

Номер перфокарт	Обозначение	Значение
1	$r_к$	464
	n_1	3327
	n_2	3667
	c	81
	r_c	494
	r_4	415,25
	$r_б$	415,25
	$r_н$	413
2	l	236
	z	24
	F_1	1510
	F_2	1839,4
	J_x	11 800
	J_y	$7{,}934 \cdot 10^5$
	α	0,89
	$F_{кол}$	981
3	$a_{сп}$	50
	$a_{анк}$	—59,5
	$a_{болт}$	—92
	$a_{шва}$	—97
	$d_{сп}$	3,2
	$d_{анк}$	0,15
	$d_{болт}$	0,016
	$d_{шва}$	1,5
4	r_1	494
	r_5	415
	r_3	476
	a_1	17
	a_7	—33,53
	a_5	12,03
	l_1	46,03
	l_2	32,97
5	h_3	37
	h_5	90

Номер перфокарт	Обозначение	Значение
5	l_3	46
	l_4	33
	$h_{ц_1}$	90
	$R_{ц_1}$	495
	$h_{ц_2}$	170
	$R_{ц_2}$	440
6	P_1	$1{,}333 \cdot 10^8$
	H_1	1410
	p	7,65
	P_5	$1{,}68 \cdot 10^5$
	$G_{стат}$	$0{,}6 \cdot 10^6$
	P_7	$8{,}461 \cdot 10^5$
	$h_п$	250
	a	1313
	b	545
7	n	6
8	z_1	57,03
	r_1	413
	z_2	33
	r_3	392,5
9	x	—45
		—40
		—35
		—30
		40
		60
10	y	0
		2
		4
		5
		0
		—8



Черт. 17

Таблица 21

x_1, кгс·см/см	x_2, кгс/см	x_3, кгс·см/см	x_4, кгс/см	x_5, кгс/см	x_6, кгс/см	x_7, кгс·см/см
$1{,}63 \cdot 10^4$	220	$8 \cdot 10^4$	538	444	238	$7{,}4 \cdot 10^4$

Продолжение

Напряжения σ, кгс/см²			
в верхнем поясе	в нижнем поясе	в колоннах (растяжение)	
		без учета бетона	с учетом бетона
464	266	646	591

Таблица 22

Координаты точек, *см*		Напряжения в колоннах, *кгс/см²*			
		у верхнего пояса		у нижнего пояса	
x_i	y_i	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{изг}+\sigma_{раст}$	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{изг}+\sigma_{р}$
—45	0	862	1453	—495	95
—40	2	813	1405	—467	123
—5	4	765	1356	—440	150
—30	5	693	1284	—398	193
—40	0	766	1357	—440	150
60	8	—1338	—747	769	1360

ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. Л. — М., Судпромгиз, 1962.

2. Постоев В. С., Зиндман А. П. Расчет спиральных камер гидротурбин совместно с железобетонным блоком агрегата. — Труды ЦКТИ. Вып. 109. Л., 1971.

3. Строительные нормы и правила. Ч. II, разд. В, гл. I, «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования». Госстройиздат, 1963.

4. Шаманский В. Е. Методы численного решения краевых задач на ЭЦВМ. АН УССР, 1963.

5. Носова П. Н., Тумаркин С. А. Таблицы обобщенных функций Эйри для асимптотического решения дифференциальных уравнений. Вычислительный центр АН СССР, 1961.

6. Осипова А. Н., Тумаркин С. А. Таблицы для расчета торообразных оболочек. Вычислительный центр АН СССР, 1963.

7. Франк-Каменецкий Г. Х. Расчет на прочность овальных сечений спиральной камеры гидротурбины. — «Энергомашиностроение», 1969, № 6.

8. Аронсон А. Я. [и др.]. Расчет на прочность деталей гидротурбин. Изд-во «Машиностроение», 1965.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1. Расчетная схема статора и спиральной камеры, не подкрепленных железобетонным блоком 1
2. Расчетная схема статора и спиральной камеры, подкрепленных со стороны статора железобетонным поясом 7
3. Подготовка исходных данных для расчета на ЭЦВМ 9
4. Примеры расчета 11
5. Основные предпосылки схемы расчета ЛМЗ и допускаемые напряжения 21
6. Предварительный выбор толщин и марок материалов листов спиральной камеры 21
7. Расчет круговых сечений спиральной камеры 29
8. Расчет круговых сечений спиральной камеры с учетом ребер . . 31
9. Расчет овальных сечений спиральной камеры 35
10. Коэффициент цикличности 38
11. Расчет статора, не подкрепленного железобетоном, на несимметричную нагрузку 38
12. Расчет забетонированного статора 40
13. Примеры расчета спиральной камеры 41
14. Примеры расчета статоров 48

Литература 54

Ответственный за выпуск *В. С. Розанова.*

Редактор *З. Т. Потапова.*

Техн. ред. *Н. П. Белянина.* Корректор *Г. Х. Макарова.*

Сдано в набор 25/IX 1972 г. Подп. к печ. 18/V 1973 г. Форм. бум. $60\times90^{1}/_{16}$.
Объем $3^{5}/_{8}$ печ. л. Тираж 500. Зак. 642. Цена 73 коп.

gost.e-ecolog.ru

Группа полиграфических работ ОНТИ ЦКТИ им. И. И. Ползунова.
194021, Ленинград, Политехническая ул., д. 24.