



О Т Р А С Л Е В О Й С Т А Н Д А Р Т

**ДИАФРАГМЫ
ПАРОВЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ТУРБИН
РАСЧЕТ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

ОСТ 108.210.01—86

Издание официальное

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ
МОСКВА

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ указанием Министерства
энергетического машиностроения от 06.03.86 № СЧ-002/1992

ИСПОЛНИТЕЛИ: **Н. Н. ВИНОГРАДОВ**, канд. техн. наук (руководитель
темы); **И. З. ЦЕЯТЛИН**, канд. техн. наук; **Л. Д. ВИНО-**
ГРАДОВА

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'L. D. Vinogradova', written in a cursive style.

**ДИАФРАГМЫ ПАРОВЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ТУРБИН
РАСЧЕТ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ****ОСТ 108.210.01—86**

Взамен ОСТ 108.210.01—76

Указанием Министерства энергетического машиностроения от 06.03.86 № СЧ-002/1992 срок введения установлен

с 01.07.87

Настоящий стандарт распространяется на диафрагмы, изготавливаемые по ОСТ 108.021.04—78, и устанавливает методы расчета прочности и жесткости диафрагм в условиях упругого деформирования и ползучести.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Расчет прочности и жесткости диафрагм должен производиться в два этапа:

на стадиях эскизного и технического проекта производится типовой расчет, который применим при величине отношения высоты канала к ширине диафрагмы не более 0,4 и при условии, что максимальная толщина тела не превосходит максимальную толщину обода (без учета козырька) более чем на 50%;

на стадии рабочего проектирования производится поверочный расчет.

1.2. Типовой расчет, в основу которого положена упрощенная расчетная схема диафрагмы как полукольцевого стержня, опертого по внешнему контуру и нагруженного равномерным давлением, дает возможность оценить напряжения и прогибы с учетом осредненных жесткостных характеристик диафрагмы.

Типовой расчет позволяет также оценить остаточные прогибы, возникающие в стадии ползучести (см. справочное приложение 1).

1.3. Поверочный расчет, в основу которого положено решение задачи поперечного изгиба плоской стержневой системы, позволяет определить напряжения и прогибы во всех элементах диафрагмы и учесть особенности их закрепления в корпусе или обойме, различия в условиях работы и свойствах материалов элементов диафрагмы. Расчетная схема и методика поверочного расчета приведены в обязательных приложениях 2 и 3.

1.4. Благодаря приводимым в данном стандарте вспомогательным графикам для производства типового расчета достаточно выполнить несколько элементарных вычислений.

Поверочный расчет производится на ЭВМ ЕС-1052 на основе программы, составленной на алгоритмическом языке «Фортран». Он может выполняться и на ЭВМ других типов по соответствующим программам, составленным на основе расчетной схемы, принятой в данном отраслевом стандарте.

1.5. Поверочный расчет выполняется на стадии рабочего проектирования и служит для окончательного выбора геометрических размеров, формы и материала элементов диафрагмы при разработке ее рабочих чертежей. Он является также основанием для усовершенствования конструкции диафрагмы путем оптимизации соотношений между определяющими геометрическими параметрами при модернизации турбин. При необходимости поверочный расчет можно использовать полностью или частично на стадиях эскизного и технического проектирования.

1.6. При выполнении расчетов диафрагм как типовым, так и поверочным методом козырек не принимается во внимание (см. рекомендуемое приложение 4).

1.7. Расчетные величины перепада давления на диафрагму и температуры металла принимаются по режиму с максимальным расходом пара на ступень при номинальных параметрах свежего пара. Для ступеней, у которых максимальные температуры и перепады давления относятся к разным режимам (турбины с противодавлением и турбины с регулируемыми отборами пара), выбирается режим,

при котором получается наименьший запас прочности. В расчете перепад давления на диафрагму принимается равным расчетному перепаду давления на ступень, а температура металла для всех элементов диафрагмы принимается одинаковой и равной температуре пара на входе в ступень.

1.8. Значения механических характеристик, в том числе предела текучести $\sigma_{0,2}$ и предела длительной прочности $\sigma_{дл}$ металла диафрагм, за расчетный срок службы принимаются по нижнему уровню норм механических свойств, приводимых в соответствующих стандартах, ТУ или справочниках для температуры $t = t_{расч}$.

1.9. Рекомендуемые настоящим стандартом минимальные значения коэффициентов запаса прочности обеспечивают нормальную работоспособность диафрагм турбин на расчетном сроке службы при условии, что технология и качество изготовления диафрагм и их материалы соответствуют требованиям ОСТ 108.021.04—78 и техническим условиям на поставку турбины, а для диафрагм турбин АЭС — также требованиям РТМ 24.020.15—73.

При этом режимы эксплуатации турбины должны соответствовать требованиям инструкции по эксплуатации, представляемой или утверждаемой предприятием — изготовителем турбины.

1.10. Если при расчете диафрагм, работающих при температуре свыше 450°C , использовались данные о ползучести металла, полученные путем экстраполяции, то работоспособность диафрагм на расчетном сроке службы обеспечивается при условии предусмотренного «Инструкцией по наблюдению и контролю за металлом котлов турбин и трубопроводов» (И 34—70—010—84) контроля остаточных прогибов диафрагм при ревизиях турбины.

1.11. Приведенную в стандарте методику расчета диафрагм можно факультативно применять также для оценки работоспособности диафрагм, отработавших нормативный ресурс. При этом возможность дальнейшей эксплуатации диафрагмы определяется в соответствии с установленным Минэнерго СССР «Положением о порядке установления сроков дальнейшей эксплуатации котлов, турбин и паропроводов, проработавших свыше 100 тыс. часов» с учетом остаточных прогибов диафрагм, измеренных при ревизиях.

1.12. Настоящий отраслевой стандарт не регламентирует прочность сварных соединений элементов диафрагм. Требования к прочности сварных швов устанавливаются заводом — изготовителем диафрагм в зависимости от принятой технологии сварки, методов контроля качества шва и опыта эксплуатации с учетом соответствующих указаний ОСТ 108.021.04—78.

1.13. Примеры типового расчета диафрагм приведены в справочном приложении 1, пример поверочного расчета — в справочных приложениях 5 и 6.

Расчеты геометрических характеристик сечений производятся согласно рекомендуемому приложению 4 и справочному приложению 5.

1.14. Допускаемые напряжения и запасы прочности должны выбираться таким образом, чтобы исключить появление опасного состояния материала конструкции в заданных условиях эксплуатации.

1.14.1. Для всех диафрагм, работающих как в упругих условиях, так и в условиях ползучести, предусматривается запас по пределу текучести $\sigma_{0,2}$. Запас назначается по отношению к максимальной величине расчетных упругих напряжений в соответствующем элементе диафрагмы.

Минимальные величины коэффициентов запаса прочности n_T :

Для тела диафрагмы	1,6
Для направляющих лопаток без ребер жесткости:	
при напряжении растяжения на выходной кромке крайней лопатки	1,25
при напряжении сжатия на входной кромке крайней лопатки	1,0
Для направляющих лопаток с ребрами жесткости при напряжениях растяжения и сжатия	1,0
Для ребер жесткости:	
при напряжении растяжения	1,25
при напряжении сжатия	1,0

1.14.2. Для диафрагм, работающих в условиях ползучести при нормативном ресурсе 100 тыс. ч и менее, помимо запасов, указанных в п. 1.14.1, устанавливаются следующие минимальные запасы $n_{дл}$ по пределу длительной прочности $\sigma_{дл}^{10^5}$ (назначается по отношению к максимальной величине расчетных упругих напряжений при типовом расчете и по отношению к максимальной величине расчетных напряжений ползучести — при поверочном расчете):

Для тела диафрагмы	1,5
Для направляющих лопаток без ребер жесткости:	
при напряжении растяжения на выходной кромке крайней лопатки	1,1
при напряжении сжатия на входной кромке крайней лопатки	1,0
Для направляющих лопаток с ребрами жесткости при напряжениях растяжения и сжатия	1,0
Для ребер жесткости:	
при напряжении растяжения	1,2
при напряжении сжатия	1,0

1.14.3. При нормативном ресурсе турбины более 100 тыс. ч все перечисленные в п. 1.14.2 минимальные значения коэффициентов запаса прочности увеличиваются на 5% при ресурсе от 100 тыс. ч до 150 тыс. ч и на 10% при ресурсе от 150 до 200 тыс. ч по отношению к пределу длительной прочности за соответствующий ресурс.

1.14.4. Определение допустимой величины максимального прогиба диафрагмы производится в следующем порядке:

из расчета теплового состояния ротора и статора и их деформаций от действующих нагрузок определяется минимальный допустимый зазор в уплотнениях и соответствующая ему величина прогиба диафрагмы w ;

расчетные величины упругого и остаточного прогибов диафрагмы должны удовлетворять условию

$$1,4 w_y + K w_{ост} \leq w,$$

где коэффициент K имеет следующие значения:

при ресурсе до 100 тыс. ч — 1,3;

при ресурсе от 100 до 150 тыс. ч — 1,4;

при ресурсе от 150 до 200 тыс. ч — 1,5.

Расчет величины $w_{ост}$ также выполняется для соответствующего ресурса.

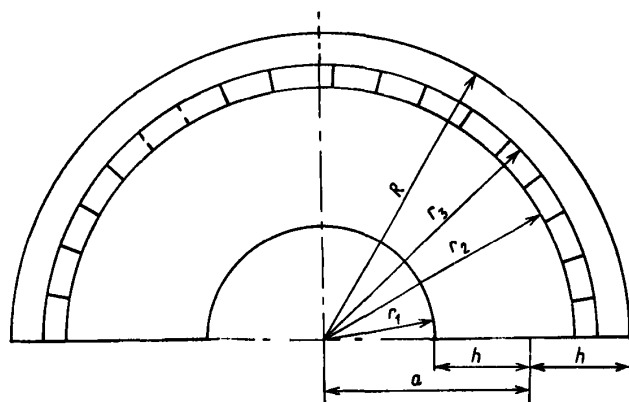
1.14.5. При расчетах диафрагм на стадии эскизного проекта разрешается все запасы прочности по напряжениям уменьшить на 10% и не проводить проверку максимальных прогибов по п. 1.14.4.

2. ТИПОВОЙ РАСЧЕТ

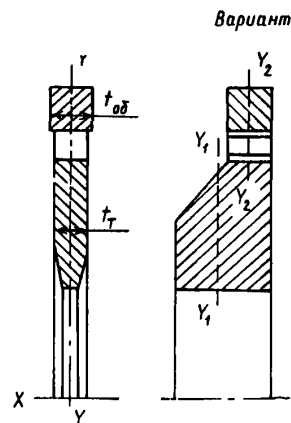
2.1. Условные обозначения

2.1.1. Схема диафрагмы изображена на черт. 1.

Схема диафрагмы



Черт. 1



В расчете приняты следующие условные обозначения:

r_1 — внутренний радиус диафрагмы, см;

r_2 — внутренний радиус лопаточного венца, см;

r_3 — наружный радиус лопаточного венца, см;

R — наружный радиус диафрагмы, см;

$$a = \frac{1}{2}(R + r_1) \text{ — средний радиус диафрагмы, см;}$$

$$h = \frac{1}{2}(R - r_1) \text{ — полуширина диафрагмы, см;}$$

S_r — площадь поперечного сечения тела диафрагмы, см²;

$S_{об}$ — площадь поперечного сечения обода диафрагмы, см²;

S_n — площадь поперечного сечения направляющей лопатки, см²;

S_p — площадь поперечного сечения ребра жесткости, см²;

$$t_r = \frac{S_r}{r_2 - r_1} \text{ — расчетная толщина тела диафрагмы, см;}$$

$$t_{об} = \frac{S_{об}}{R - r_3} \text{ — расчетная толщина обода диафрагмы, см;}$$

$$t_{cp} = \frac{S_{\tau} + S_{об}}{(R-r_3) + (r_2-r_1)} \text{ — средняя расчетная толщина диафрагмы, см;}$$

J_{τ} — момент инерции поперечного сечения тела диафрагмы относительно продольной оси Y_1 , проходящей через центр масс этого сечения перпендикулярно оси турбины, см⁴;

$J_{об}$ — момент инерции поперечного сечения обода диафрагмы относительно продольной оси Y_2 , проходящей через центр масс этого сечения перпендикулярно оси турбины, см⁴;

$J = J_{\tau} + J_{об}$ — суммарный момент инерции сечения диафрагмы, см⁴;

l_n — длина направляющей лопатки (в случае диафрагм с криволинейным обводом лопаточного канала под l_n понимается полусумма длин входной и выходной кромок), см;

l_p — длина ребра жесткости, см;

$$\psi = \frac{2h - l_n}{2h} \text{ — коэффициент ослабления;}$$

$2n$ — число направляющих лопаток в ступени;

z — число ребер жесткости в половине диафрагмы;

$$\Delta\varphi = \frac{180}{n} \text{ — центральный угол, приходящийся на одну направляющую лопатку, ... }^\circ;$$

$\Delta\varphi_p$ — центральный угол, приходящийся на одно ребро у разъема, ... }^\circ;

J_n — момент инерции поперечного сечения направляющей лопатки относительно оси $Z-Z$, проходящей через центр масс сечения лопатки параллельно плоскости диафрагмы, см⁴;

J_p — момент инерции сечения ребра жесткости относительно оси, проходящей через центр масс сечения ребра параллельно плоскости диафрагмы, см⁴;

$u_{вх}$ — расстояние от оси $Z-Z$ до входной кромки направляющей лопатки, см;

$u_{вых}$ — расстояние от оси $Z-Z$ до выходной кромки направляющей лопатки, см;

$$W_{вх} = \frac{J_n}{u_{вх}} \text{ — момент сопротивления сечения лопаток относительно входной кромки, см}^3;$$

$$W_{вых} = \frac{J_n}{u_{вых}} \text{ — момент сопротивления сечения лопатки относительно выходной кромки, см}^3;$$

$W_p^{вх}, W_p^{вых}$ — моменты сопротивления сечения ребра относительно входной и выходной его кромок соответственно, см³;

p — перепад давления на диафрагме, МПа;

E — модуль Юнга, МПа;

ν — коэффициент поперечной деформации (Пуассона);

σ — напряжение, МПа;

ϵ — деформация, %;

w — прогиб, см;

w_y — упругий прогиб, см;

$w_{ост}$ — остаточный прогиб, вызванный ползучестью, см;

M — изгибающий момент, Н·м;

T — продольная сила, Н;

K_σ, K_w, K_m, K_n — безразмерные коэффициенты.

2.2. Расчет упругих прогибов и напряжений в теле диафрагмы

2.2.1. Максимальный упругий прогиб диафрагмы имеет место на внутреннем контуре у разъема. Он вычисляется по формуле

$$w_y = \frac{4h^3 a^2 p}{EJ} K_w. \quad (1)$$

Коэффициент прогиба K_w определяется по черт. 2.

2.2.2. Максимальное нормальное напряжение в теле диафрагмы имеет место на внутреннем контуре в среднем сечении. Оно определяется по формуле

$$\sigma_\tau = \pm \frac{ph^2 a}{(1-\nu^2)J} \frac{t_\tau}{2} K_\sigma. \quad (2)$$

Коэффициент напряжения K_σ определяется по черт. 2.

2.3. Расчет напряжений в направляющих лопатках

2.3.1. Наиболее напряженной является крайняя лопатка. Максимальный изгибающий момент в этой лопатке, действующий у заделки в тело диафрагмы, определяется по формуле

$$M = K_m \frac{\rho R^3}{192}. \quad (3)$$

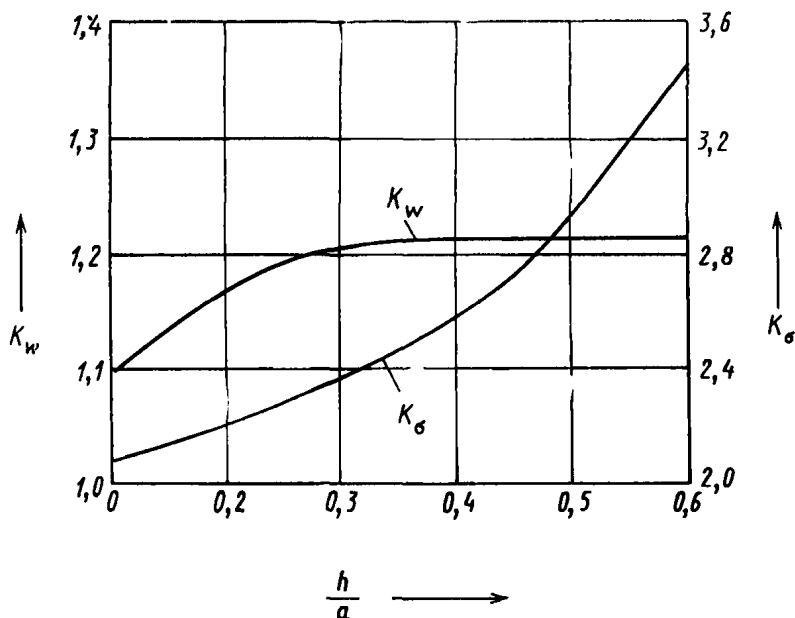
Коэффициент момента K_m определяют по черт. 3 в зависимости от значения отношения r_2/R и углового шага $\Delta\phi$.

2.3.2. Напряжения в лопатке на входной и выходной кромках вычисляют по формулам:

$$\sigma_{\text{вх}} = - \frac{M}{W_{\text{вх}}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{вых}} = \frac{M}{W_{\text{вых}}}. \quad (5)$$

Зависимость коэффициентов K_w , K_σ от отношения h/a



Черт. 2

Напряжение на входных кромках лопаток сжимающее, на выходных — растягивающее.

2.3.3. Приведенная формула расчета лопаток применяется независимо от того, как выполнен разъем, причем величины $W_{\text{вх}}$, $W_{\text{вых}}$ всегда вычисляются для полного сечения лопатки, а угловой шаг $\Delta\phi$ во всех случаях определяется по формуле $\Delta\phi = 180^\circ/n$. Это обеспечивает дополнительный запас прочности для случая, когда крайняя лопатка усеченная или ослабленная (без вытеснителя).

2.4. Расчет ребер жесткости

2.4.1. Расчет проводится для расчетного отсека диафрагмы, приходящегося на одно ребро, ближайшее к разьему диафрагмы (черт. 4).

2.4.2. Полный изгибающий момент M , воспринимаемый расчетным отсеком (ребром и лопатками), определяется по формуле (3) и черт. 3, при этом вместо углового шага лопаток $\Delta\phi$ следует использовать угловой шаг ребер $\Delta\phi_r$ на участке, примыкающем к разьему диафрагмы.

2.4.3. Изгибающие моменты в ребре M_p и в лопатках M_l на расчетном отсеке определяются по формулам:

$$M_p = \frac{M}{1 + a + \frac{b}{1+b} \frac{S_p a^2}{J_p}}; \quad (6)$$

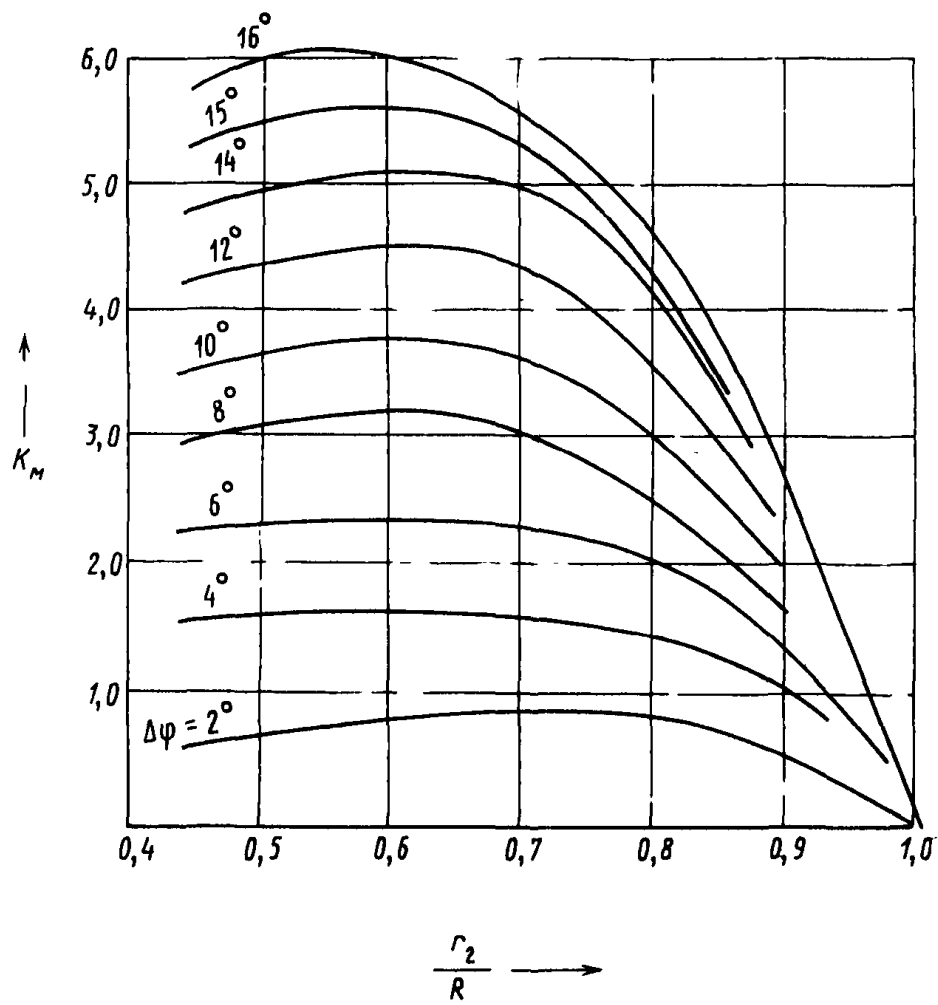
$$M_l = \frac{a}{z} M_p, \quad (7)$$

$$\text{где } a = z \frac{l_p}{l_l} \frac{E_l}{E_p} \frac{J_l}{J_p};$$

$$b = z \frac{l_p}{l_l} \frac{E_l}{E_p} \frac{S_l}{S_p};$$

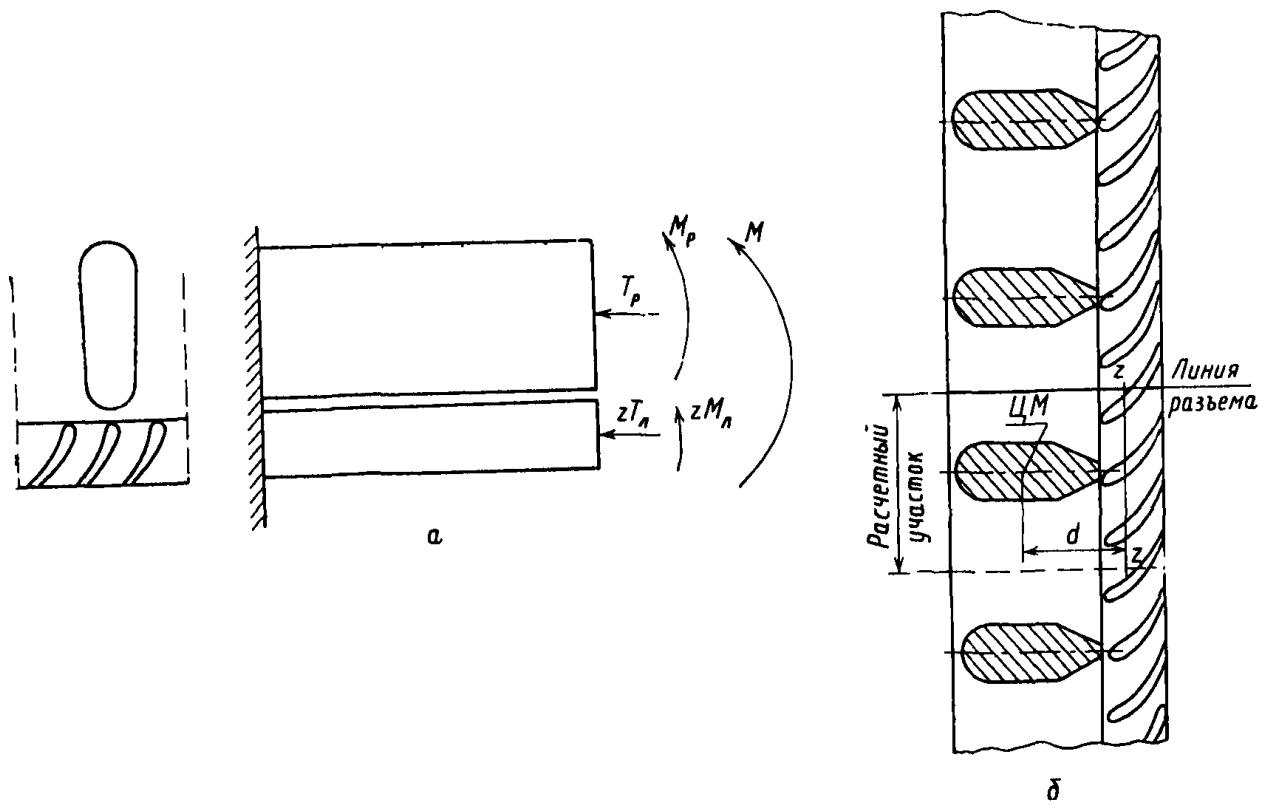
d — расстояние между плоскостями, проходящими через центры лопаток и ребер (см. черт. 4), см.

Зависимость коэффициента K_M от отношения r_2/R



Черт. 3

Схема диафрагмы с ребрами жесткости



а — схема расчетного участка; б — развертка по лопаточному венцу

Черт. 4

2.4.4. Продольные усилия в лопатке T_l и в ребре T_p определяются по соотношениям:

$$T_p = \frac{b}{1+b} \frac{d S_p}{J_p} M_p; \quad (8)$$

$$T_l = \frac{T_p}{z}. \quad (9)$$

Принятые положительные направления усилий и моментов показаны на черт. 4.

Продольное усилие T_p в ребре всегда сжимающее, усилие T_l в лопатке — растягивающее.

2.4.5. При расчете напряжений в ребрах поддерживающее влияние лопаток не учитывается, поэтому следует принимать:

$$\sigma_p^{\text{вх}} = -\frac{M}{W_p^{\text{вх}}} \text{ — для напряжений на входной кромке ребра,}$$

$$\sigma_p^{\text{вых}} = \frac{M}{W_p^{\text{вых}}} \text{ — для напряжений на выходной кромке ребра.}$$

2.4.6. Напряжения в лопатках подсчитываются по формулам:

$$\sigma_l^{\text{вх}} = \frac{T_l}{S_l} - \frac{M_l}{W_l^{\text{вх}}} \text{ — на входной кромке лопатки,} \quad (10)$$

$$\sigma_l^{\text{вых}} = \frac{T_l}{S_l} + \frac{M_l}{W_l^{\text{вых}}} \text{ — на выходной кромке лопатки.} \quad (11)$$

Величины M_p , T_p , M_l , T_l всегда положительны, поэтому напряжения на входной кромке ребра всегда сжимающие, на выходной кромке лопатки — всегда растягивающие.

Напряжения на выходной кромке лопатки могут быть как положительными, так и отрицательными. Их знак определяется в результате вычислений согласно формулам (10) и (11).

2.5. Расчет прогибов диафрагмы, вызванных ползучестью

2.5.1. Для вычисления остаточных прогибов диафрагмы, вызванных ползучестью, вначале необходимо определить по формуле (1) упругий прогиб диафрагмы w_y . Остаточный прогиб, вызванный ползучестью, определяется по формуле

$$w_{\text{ост}} = K_n w_y. \quad (12)$$

Коэффициент ползучести K_n , входящий в эту формулу, показывает, какую долю составляет остаточный прогиб $w_{\text{ост}}$ от величины упругого прогиба w_y .

2.5.2. Для расчета коэффициента ползучести K_n вначале определяется эквивалентное нормальное напряжение σ_0 , характеризующее средний уровень напряженности диафрагмы:

$$\sigma_0 = \frac{3}{2} \frac{(3a-h)h}{t_{\text{ср}}^2 \psi} p, \quad (13)$$

где ψ — коэффициент ослабления сечения диафрагмы каналами для пропуска пара; коэффициент ψ вычисляется по формуле

$$\psi = \frac{2h - l_l}{2h}.$$

По соответствующим характеристикам ползучести материала диафрагмы (тела и обода) определяется эквивалентная деформация ползучести $\epsilon_n(\sigma_0, \tau)$, которая накапливается за расчетное время τ при стандартном испытании на ползучесть цилиндрического образца в условиях растяжения при постоянном напряжении σ_0 .

Затем определяется упругая деформация растяжения при том же напряжении

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_0}{E}, \quad (14)$$

где значение модуля упругости E берется для температуры, равной расчетной температуре диафрагмы $t_{\text{расч}}$.

С учетом найденных величин определяется коэффициент ползучести по формуле

$$K = \frac{\epsilon_n(\sigma_0, \tau)}{\epsilon_y(\sigma_0)}. \quad (15)$$

ПРИМЕРЫ ТИПОВОГО РАСЧЕТА

1. ДИАФРАГМЫ БЕЗ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ (черт. 1)

1.1. Исходные данные

1.1.1. Геометрические характеристики:

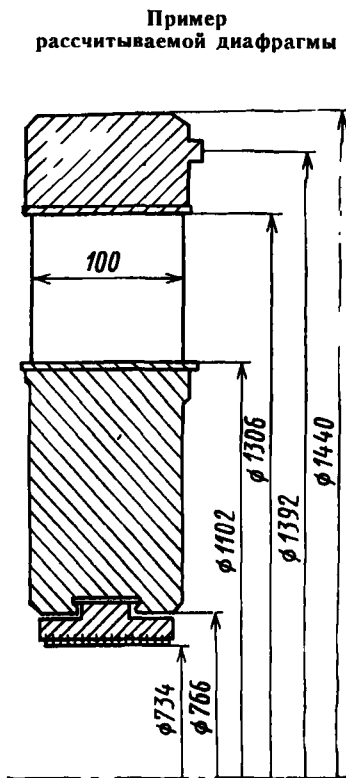
Наружный радиус R , см	72,0
Внутренний радиус r_1 , см	38,3
Наружный радиус тела r_2 , см	55,1
Момент инерции поперечного сечения диафрагмы J , см ⁴	2081
Расчетная толщина тела диафрагмы t_T , см	9,8
Средняя расчетная толщина диафрагмы t_{cp} , см	10,0
Длина лопатки l_L , см	10,2
Момент сопротивления профиля лопатки относительно входной кромки $W_{вх}$, см ³	28,3
Момент сопротивления относительно выходной кромки $W_{вых}$, см ³	34,6
Число лопаток (на половину диафрагмы) n	19
Средний радиус диафрагмы a , см	55,2
Полуширина диафрагмы h , см	16,9
Коэффициент ослабления ψ	0,698
Отношение h/a	0,306

1.1.2. Условия нагружения:

Перепад давления p , МПа	0,57
Температура θ , °С	520

1.1.3. Данные о материале диафрагмы:

Материал тела и обода	Сталь марки 12Х1МФ по ГОСТ 5632—72
Модуль Юнга E , МПа	$1,75 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	314
Предел прочности σ_B , МПа	432
Предел длительной прочности $\sigma_{д.п.}$, МПа:	
для $\tau = 5 \cdot 10^4$	163
для $\tau = 10^5$	154
Материал лопаток	Сталь марки 15Х11МФ по ГОСТ 5632—72
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	412
Предел прочности σ_B , МПа	500



Черт. 1

1.2. Упругий расчет

1.2.1. По черт. 2 стандарта находим для отношения $h/a=0,306$ коэффициент $K_w=1,21$. Подставляя в расчетную формулу (1) соответствующие численные значения, получаем величину прогиба

$$w = \frac{4h^3 a^2 p}{EJ} K_w = \frac{4 \cdot 16,9^3 \cdot 55,2^2 \cdot 0,57}{1,75 \cdot 10^5 \cdot 2081} 1,21 = 0,11 \text{ см} = 1,1 \text{ мм.}$$

1.2.2. По черт. 2 стандарта находим $K_\sigma = 2,36$. Подставляя в расчетную формулу (2) соответствующие числовые значения, получаем

$$\sigma_\tau = \frac{ph^2 a}{(1-\nu^2)J} \frac{t_T}{2} K_\sigma = \frac{0,57 \cdot 16,9^2 \cdot 55,2}{(1-0,3^2) 2081} \frac{9,8}{2} 2,36 = 55 \text{ МПа.}$$

1.2.3. Вычисляем угловой шаг лопаток

$$\Delta\varphi = \frac{180}{n} = \frac{180}{19} = 9,5^\circ$$

и отношение

$$\frac{r_2}{R} = \frac{55,1}{72,0} = 0,77,$$

по черт. 3 стандарта находим $K_M = 3,1$.

Изгибающий момент в крайней лопатке определяем по формуле (3)

$$M = K_M \frac{pR^3}{192} = 3,1 \frac{0,57 \cdot 72^3}{192} = 3435 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Напряжения на входной кромке лопатки вычисляем по формуле (4)

$$\sigma_{\text{вх}} = -\frac{M}{W_{\text{вх}}} = -\frac{3435}{28,3 \cdot 10^{-6}} = -121 \text{ МПа}.$$

Напряжения на выходной кромке лопатки находим по формуле (5)

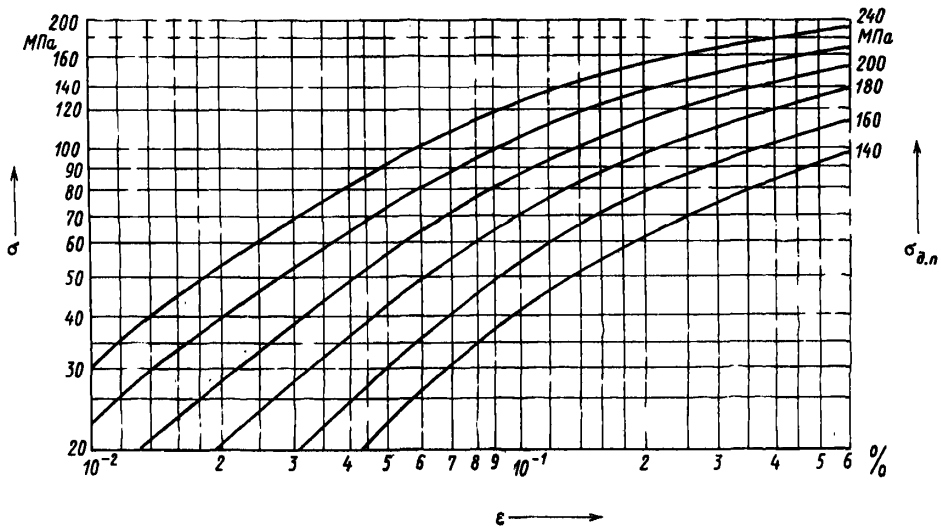
$$\sigma_{\text{вых}} = \frac{M}{W_{\text{вых}}} = \frac{3435}{34,6 \cdot 10^{-6}} = 99 \text{ МПа}.$$

1.3. Расчет остаточных прогибов при ползучести

1.3.1. Вычисляется эквивалентное напряжение в диафрагме по формуле (13)

$$\sigma_0 = \frac{3(3a-h)h}{2r_{\text{ср}}^2 \psi} p = \frac{3}{2} \frac{(3 \cdot 55,2 - 16,9) 16,9}{10^2 \cdot 0,698} 0,57 = 31 \text{ МПа}.$$

Обобщенная диаграмма ползучести



Черт. 2

1.3.2. Для определения эквивалентной деформации ползучести $\epsilon_{\text{п}}$ (σ_0 , τ) необходимо располагать соответствующими данными о свойствах ползучести материала. На черт. 2 справочного приложения 1 приведены в двойных логарифмических координатах обобщенные изохронные кривые ползучести для сталей марок 12ХМФ, 15Х1М1Ф, 20ХМ, 15ХМ, 12МХ по ГОСТ 5632—72 при сроках службы τ от 40 до 100 тыс. ч и температурах 450—550°C. Этими кривыми можно пользоваться для приближенной оценки обобщенной деформации ползучести $\epsilon_{\text{п}}$ при отсутствии прямых экспериментальных данных.

Чтобы пользоваться кривыми черт. 2, необходимо знать величину предела длительной прочности $\sigma_{\text{д.п.}}$ данной стали для принятой температуры и расчетного срока службы. Найдя на черт. 2 кривую, отвечающую данному значению $\sigma_{\text{д.п.}}$, и откладывая по оси ординат значение σ_0 , определяем по оси абсцисс соответствующее значение $\epsilon_{\text{п}}$.

Для материала диафрагмы — сталь 12ХМФ при сроке службы $\tau = 100$ тыс. ч имеем $\sigma_{\text{д.п.}} = 154$ МПа.

Указанным способом по черт. 2 находим:

для $\tau = 50$ тыс. ч $\epsilon_{\text{п}} = 4,3 \cdot 10^{-2} \%$;

для $\tau = 100$ тыс. ч $\epsilon_{\text{п}} = 5,1 \cdot 10^{-2} \%$.

1.3.3. Вычисляем упругую деформацию, отвечающую эквивалентному напряжению σ_0 ,

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_0}{E} = \frac{31}{1,75 \cdot 10^6} = 1,77 \cdot 10^{-2} \%$$

и соответствующие значения коэффициента ползучести диафрагмы:
для $\tau=50$ тыс. ч

$$K_n = \frac{4,3 \cdot 10^{-2}}{1,77 \cdot 10^{-2}} = 2,43;$$

для $\tau=100$ тыс. ч

$$K_n = \frac{5,1 \cdot 10^{-2}}{1,77 \cdot 10^{-2}} = 2,88.$$

1.3.4. По формуле (12) находим остаточные прогибы:

для $\tau=50$ тыс. ч

$$w_{\text{ост}} = K_n w_y = 2,43 \cdot 1,1 = 2,7 \text{ мм};$$

для $\tau=100$ тыс. ч

$$w_{\text{ост}} = K_n w_y = 2,88 \cdot 1,1 = 3,2 \text{ мм}.$$

2. ДИАФРАГМА С РЕБРАМИ ЖЕСТКОСТИ

2.1. Исходные данные

2.1.1. Геометрические характеристики:

Наружный радиус диафрагмы R , см	49,8
Наружный радиус тела r_2 , см	40,6
Отношение r_2/R	0,817
Момент сопротивления ребра, см ³ :	
относительно входной кромки $W_p^{\text{вх}}$	27,4
относительно выходной кромки $W_p^{\text{вых}}$	25,0
Момент сопротивления лопатки, см ³ :	
относительно входной кромки $W_l^{\text{вх}}$	1,213
относительно выходной кромки $W_l^{\text{вых}}$	1,376
Момент инерции сечения ребра J_p , см ⁴	130,7
Момент инерции сечения лопатки J_l , см ⁴	1,935
Площадь поперечного сечения ребра S_p , см ²	18,18
Площадь поперечного сечения лопатки S_l , см ²	3,26
Число ребер (на половину диафрагмы) n_p	39
Число лопаток (на крайнее ребро) z	1
Перепад давления p , МПа	1,78
Угловой шаг ребер $\Delta\varphi \dots^\circ$	$\frac{180}{39} = 4^\circ 36'$
Расстояние d , см	7,5

Наличие в диафрагме ребер жесткости при предварительном расчете влияет только на напряжения в элементах направляющего аппарата, поэтому ниже приводится пример расчета напряжений в лопатках и ребрах жесткости.

2.2. Расчет напряжений в ребрах

2.2.1. Изгибающий момент в расчетном отсеке определяем в соответствии с п. 2.4.2 стандарта:

$$M = 1,83 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.2.2. По формулам п. 2.4.5 стандарта вычисляем:
напряжения на входной кромке ребра

$$\sigma_p^{\text{вх}} = - \frac{M}{W_p^{\text{вх}}} = - \frac{1,83 \cdot 10^3}{27,4 \cdot 10^{-6}} = -67,0 \text{ МПа};$$

напряжения на выходной кромке ребра

$$\sigma_p^{\text{вых}} = \frac{M}{W_p^{\text{вых}}} = \frac{1,83 \cdot 10^3}{25,0 \cdot 10^{-6}} = 73,0 \text{ МПа}.$$

2.3. Расчет напряжений в лопатках

2.3.1. По формулам п. 2.4.3 стандарта подсчитываем вспомогательные величины (при $l_p = l_l$, $E_p = E_l$):

$$a = z \frac{l_p}{l_l} \frac{E_l}{E_p} \frac{J_l}{J_p} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{1,935}{130,7} = 0,0148;$$

$$b = z \frac{l_p}{l_l} \frac{E_l}{E_p} \frac{S_l}{S_p} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{3,26}{18,18} = 0,179$$

и находим изгибающие моменты:

$$M_p = \frac{M}{1 + a + \frac{b}{1+b} \frac{S_p d^2}{J_p}} = \frac{1,83 \cdot 10^3}{1 + 0,0148 + \frac{0,179}{1,179} \frac{18,18 \cdot 7,5^2}{130,7}} = 834 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_l = \frac{a}{z} M_p = 0,0148 \cdot 8,34 = 12,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.3.2. По формулам (8), (9) стандарта определяем продольные усилия:

$$T_p = \frac{b}{1+b} \frac{d S_p}{J_p} M_p = \frac{0,179}{1,179} \frac{7,5 \cdot 18,18}{130,7} 834 = 1,33 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$T_l = \frac{T_p}{z} = 1,30 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

По формулам (10), (11) стандарта находим напряжения в лопатках:

$$\sigma_l^{\text{вх}} = \frac{T_l}{S_l} - \frac{M_l}{W_l^{\text{вх}}} = \frac{13\,000}{3,26 \cdot 10^{-6}} - \frac{12,3}{1,213 \cdot 10^{-6}} = 29,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_l^{\text{вых}} = \frac{T_l}{S_l} + \frac{M_l}{W_l^{\text{вых}}} = 50,1 \text{ МПа}.$$

ПОВЕРОЧНЫЙ УПРУГИЙ РАСЧЕТ

1. МЕТОД РАСЧЕТА

1.1. Поверочный расчет основан на обобщении схемы Г. И. Пахомова. Принимаются следующие основные положения:

диафрагма рассматривается как два полукольцевых стержня: тело и обод, связанные стержнями-лопатками, лопатки жестко соединены с телом и ободом;

сосредоточенные усилия, передаваемые со стороны лопаток на тело и обод, заменяются статически эквивалентными непрерывно распределенными усилиями;

учитывается как поперечный изгиб диафрагмы, так и деформация в плоскости диафрагмы и их взаимодействие (косой изгиб);

учтено смещение опорного контура относительно края диафрагмы;

напряженно-деформированное состояние диафрагмы для принятой схемы описывается теорией криволинейных стержней Кирхгофа — Клебша.

В итоге расчет диафрагмы сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, для которых ставится краевая задача. Последняя решается методом ортогональной прогонки С. К. Годунова с использованием метода Рунге — Кутты.

2. ОБОЗНАЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

2.1. Геометрия диафрагмы:

R_Y — радиус диафрагмы по уплотнению, м;

R_0 — внутренний радиус тела диафрагмы, м;

R_1 — радиус по корню лопаток, м;

R_2 — внутренний радиус обода, м;

R_3 — радиус опорного контура диафрагмы, м;

R_4 — внешний радиус обода, м;

XK — число лопаток в полукольце диафрагмы.

2.2. Характеристики поперечных сечений тела, обода и лопаток (задаются в качестве исходных данных или передаются из программы расчета геометрических характеристик сечений):

$NSBL$ — число поперечных сечений лопаток, для тела и обода

$$NSBL = 1;$$

N — число точек, заданных на контуре сечения;

BT — угол между осью X системы координат, в которой задано сечение, и плоскостью диафрагм, ...°;

SCL — масштаб задания координат x, y ;

$XC, YC, SCLC$ — координаты и масштаб центра масс сечения;

BYS — расстояние по оси Y между центром масс и Y_{\max} сечения, м;

$MODE$ — способ задания контура сечения;

$CONT$ — массив, описывающий контур сечения;

ZBL — расстояние сечения лопатки от корня лопатки, м;

SBL — площадь сечения, м²;

JX — момент инерции сечения относительно оси X' , лежащей в плоскости диафрагм, м⁴;

JY — момент инерции сечения относительно оси Y' , перпендикулярной оси X' , м⁴;

JXY — центробежный момент инерции, м⁴;

JT — геометрическая жесткость при упругом кручении, м⁴.

2.3. Физические характеристики:

EY_i — модуль упругости, МПа;

EM_i — коэффициент Пуассона;

DLT_i — коэффициент линейного расширения;

TM_i — температура, °С;

$i = 1, 2, 3$ соответственно для тела, обода и лопаток.

2.4. Внешняя нагрузка на диафрагму:

Θ — равномерная, нормальная к плоскости диафрагмы, нагрузка на единицу площади тела и обода, МПа;

P — равномерная, нормальная к плоскости диафрагмы, нагрузка, распределенная по уплотнению на единицу длины дуги, Н/м;

NF — число точек по оси лопатки, где заданы нагрузки, действующие на единицу длины одной лопатки;

zFi — координаты этих точек, отсчитываемые от корня лопатки, м;

FX — нагрузка на единицу длины одной лопатки, нормальная к плоскости диафрагмы, Н/м;

ΘX — равномерная нормальная нагрузка на единицу площади, распределенная по всему полукольцу области лопаток, обычно $\Theta X = \Theta$; окончательно в программе принимается:

$$FXi' = FXi + \frac{\pi}{XK} (R1 + ZFi) \Theta X;$$

FY — боковая нагрузка в плоскости диафрагмы, рассчитанная на единицу длины лопатки, Н/м;

KZ — крутящий момент, действующий на единицу длины лопатки, Н.

В случае равномерной нагрузки можно задавать $NF=2$.

$$ZF1 = 0, ZF2 = R2 - R1,$$

$$FX1 = 0, FX2 = 0, \Theta X = \Theta.$$

2.5. Закрепление диафрагм в своей плоскости задается параметром IO . Всегда $w_2=0$ при $\varphi = \pm\pi/2$ и, кроме того, если

$$IO = \begin{cases} -1, & \text{то } v_2 = 0 \text{ при } \varphi = -\frac{\pi}{2}; \\ 0, & \text{то } w_2 = 0 \text{ при } \varphi = 0; \\ +1, & \text{то } v_2 = 0 \text{ при } \varphi = \frac{\pi}{2}; \end{cases}$$

$IO=2$ для осесимметричной (неразъемной) диафрагмы.

Здесь w_2 — осевое смещение оси обода, м; v_2 — радиальное смещение оси обода, м.

2.6. Нерадиальность установки лопаток:

PSI — угол отклонения оси лопатки от радиального направления, ...°.

2.7. Вспомогательные исходные величины:

NS — число равных углов, на которые делится 1/2 полукольца диафрагмы для решения дифференциальных уравнений по методу Рунге — Кутты;

REG — массив признаков печати промежуточных результатов, используется при отладке программ, для стандартных расчетов задается нуль или пробелы;

RES — шкала признаков печати результатов расчета;

$$RES=L_1, L_2, L_3, L_4, L_1=T \text{ или } F,$$

T — означает true (да), F — false (нет). При выдаче результатов всегда печатаются перемещения и напряжения: L_1 — печать во всех точках интегрирования; L_2 — печать усилий и моментов; L_3 — печать интерполированных значений в точках шкалы результатов (см. ниже); L_4 — зарезервировано;

NFI — задает автоматическое формирование шкалы результатов или число точек в шкале результатов;

$NFI=0$ — шкала результатов формируется автоматически — начинается на расстоянии 1/2 шага установки лопаток от -90° и продолжается с шагом $180^\circ/XK$ до 90° . В этом случае массив FII в исходных данных отсутствует;

$NFI=1$ — в массиве FII задано одно значение, которое считается началом шкалы результатов относительно края (-90°) и продолжается с шагом $180^\circ/XK$;

$NFI \geq 2$ — в массиве FII задано NFI точек, которые представляют собой шкалу результатов;

FII — массив шкалы результатов, задается при $NFI \geq 2$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

3.1. Режим выдачи результатов определяется шкалой печати RES и параметрами NFI и FII , как это описано в п. 2.7.

3.2. Всегда выдаются максимальные напряжения в элементах диафрагмы и максимальные прогибы, причем применяются обозначения:

FI — центральный угол, отсчитываемый от вертикальной оси диафрагмы, ...°;

$ALFA$ — номер точки на контуре сечения, в которой выдается напряжение, нумерация точек соответствует массиву координат точек контура, полученных в программе;

$SIGMA$ — соответствующее напряжение, МПа;

$WY, W0, W1, W2$ — перемещение диафрагмы в направлении от турбины, соответственно на радиусах $RY, R0, R1, R2$, м;

$ASji$ — угол между осью X системы координат, в которой задано сечение, и прямой, соединяющей центр тяжести сечения с точкой, в которой выдается напряжение;
 $ANji$ — номер точки на контуре сечения;
 $SZji$ — напряжение, МПа;
 $i = 1$ — в теле;
 $i = 2$ — в ободе;
 $i = 3$ — в лопатках у тела;
 $i = 4$ — в лопатках у обода;
 $j = 1$ — самая левая точка контура сечения;
 $j = 2$ — максимальное положительное напряжение;
 $j = 3$ — самая правая точка сечения;
 $j = 4$ — максимальное отрицательное напряжение.

Когда печатаются усилия и моменты, то применяются обозначения:

VXK, VYK, VZK — усилия, Н;
 MXK, MYK, MZK — моменты, Н·м; причем $K=1$ для тела, $K=2$ для обода, $K=3$ для лопаток у тела, $K=4$ для лопаток у обода.

Аналогичные обозначения используются для углов поворота и перемещений.

4. ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА И ТРЕБОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

4.1. Для устойчивости счѐта требуется, чтобы расстояние по радиусу между центром тяжести сечения обода и опорным контуром составляло не менее 1% от радиуса опоры.

Радиус центров тяжести сечений обода можно вычислить после определения геометрических характеристик, он равен $A2=R4 - BYC$, и условие устойчивости имеет вид $|A2 - R3| > 0,01R3$.

Если требуется рассчитать диафрагму, опертую вблизи центра тяжести сечения обода, то можно произвести два расчета для положения опоры, отстоящей от центров тяжести сечений обода на расстоянии больше предельного в большую и меньшую стороны, а затем произвести линейную интерполяцию решения (напряжений и прогибов).

Точность расчета диафрагмы зависит от величины NS , для точности порядка 1% обычно достаточно задать $NS=30$, для прикидочных расчетов $NS=20$, предельное значение $NS=50$.

5. ЗАПИСЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПЕРФОРАЦИЯ

5.1. Исходные данные для расчета диафрагмы записываются на любых стандартных бланках, имеющих 80 позиций в одной строке. Содержимое каждой строки будет помещено на одну перфокарту.

Для ввода исходных данных используются следующие группы данных:

карта с наименованием диафрагм или варианта расчета;

блоки именованных списков $\&NR, \&RSL, \&FBL, \&END$;

геометрические характеристики для сечений тела, обода и лопаток (обычно вводятся из файла 8, куда они записаны программой расчета геометрических характеристик, используются следующие данные: наименование сечения, блоки списков: $\&H, \&POL, \&GH$).

На черт. 1 показано содержание блоков данных и приведены умалчиваемые значения некоторых перемешенных.

Шаблон исходных данных для расчета диафрагмы

```

      НАИМЕНОВАНИЕ ДИАФРАГМЫ
&NR NS=50, PSI= , I0= , NOC= , RY= , R1= , R2= , R3=
R4= , XK= , Q= , P= , &END
&RSL RES=F,F,F,F, NFI= , FII= , &END
&FBL NB= , ZF= , FX= , FY= , KZ= , QX= , &END
&EDT EY= , EM= , DLT= , TM= , &END
  
```

Черт. 1

Содержимое блоков $\&H, \&POL$ объяснено в рекомендуемом приложении 4, блок $\&GH$ содержит: $XC, SCLC, BYC, ZBL, JX, JY, JXY$ и др.

6. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ДИАФРАГМЫ В ОС ЕС ЭВМ

6.1. При расчете диафрагм используется процедура ВТК, представленная на картах во входном потоке. Текст процедуры приведен на черт. 2. Задание для расчета диафрагмы приведено на черт. 3, где представлены данные для расчета геометрических характеристик и диафрагмы.

Если геометрические характеристики рассчитаны предварительно и результат хранится на диске, то для расчета диафрагмы можно удалить из задания (см. черт. 3) группы перфокарт III.

Процедура расчета диафрагмы

```
//BTK PROC PEF=BT,PROG=KR4,U=5061,V=PTOM01,VAR=1
//GO EXEC PCM=&PEF&PROG,REGION=120K
//FT05F001 DD DDNAME=SYSIN
//FT06F001 DD SYSOUT=A,DCB=(RECFM=VBA,LRECL=133,BLKSIZE=3520)
//FT08F001 DD DSN=&PEF&VAR,UNIT=&U,VOL=&SER=&V,DISP=SHR
//FT09F001 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(1924,102)
//FT10F001 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(96,102)
//FT11F001 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(96,102)
// PEND
```

Черт. 2

Задание для расчета геометрических характеристик и расчета диафрагмы

```
//SN321BGK JOB
//JOBLIB DD DNS=S0ZAM,UNIT=DA29,VOL=SER=SCAVTUR,DISP=SHR ] I
-----
| КАРТЫ ПРОЦЕДУРЫ ВТГ |
|-----|
| КАРТЫ ПРОЦЕДУРЫ ВТК |
|-----|
//G1 EXEC ВТГ,VAR=2
//GO.SYSIN DD * ] II
-----
| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК | ] III
|-----|
//G2 EXEC ВТК,VAR=2
//GO.SYSIN DD * ] IV
-----
| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАФРАГМЫ |
|-----|
// ] V
```

Черт. 3

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПОЛЗУЧЕСТИ

1. МЕТОД РАСЧЕТА

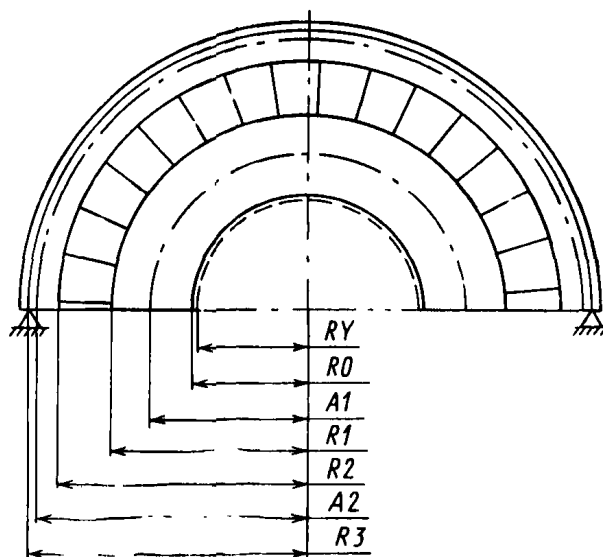
По сравнению с упругим расчетом (см. обязательное приложение 2) постановка задачи несколько упрощена: рассматривается только поперечный изгиб, деформации в плоскости диафрагмы не учитываются, что вполне допустимо для ступеней высокого и среднего давления. Для ползучести становятся нелинейными физические соотношения, связывающие деформации изгиба и кручения стержней, за счет этого дифференциальные уравнения становятся также нелинейными. Для их решения применяется метод Ньютона — Канторовича, с помощью которого нелинейная задача преобразуется в последовательность линейных задач. Последние решаются так же, как упругая задача. Исходные данные для расчета ползучести отличаются от данных упругого расчета (см. обязательное приложение 2) по форме и частично по существу.

В это же время по программе расчета ползучести можно произвести также упрощенный упругий расчет.

2. ОБОЗНАЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Расчетная схема диафрагмы и обозначения размеров представлены на черт. 1.

Расчетная схема диафрагмы



R_Y — радиус диафрагмы по уплотнению, м; R_0 — внутренний радиус тела диафрагмы, м; A_1 — радиус оси тела, м; R_1 — наружный радиус тела, м; R_2 — внутренний радиус обода, м; A_2 — радиус оси обода, м; R_3 — радиус опорного контура, м. Осью тела (обода) считается окружность, проходящая через центры тяжести поперечных сечений.

Черт. 1

Для расчета также требуются величины:

XNL — число лопаток в одной половине диафрагмы;

DFI — угол, равный π/XNL , рад;

ΘS — коэффициент ослабления крайних сечений лопаток;

$$\Theta S = \sqrt[3]{\frac{I_1}{I_2}},$$

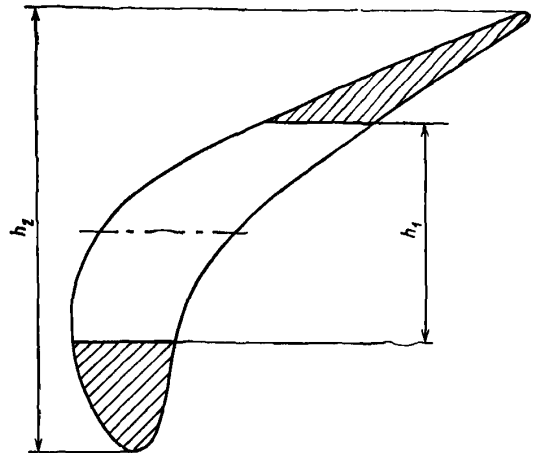
где I_1 и I_2 — соответственно моменты инерции неприваренной части и полного сечения относительно оси (прямого) изгиба, м⁴. Приближенно можно принимать $\Theta S = h_1/h_2$, где h_1 и h_2 — соответственно высоты неприваренной части и полного сечения (черт. 2);

Θ — перепад давления пара на диафрагме, МПа;

P — сила, примененная по внутреннему краю тела диафрагмы, Н/м;

- i — индекс элемента диафрагмы; для тела $i=1$, для обода $i=2$, для лопаток $i=L$;
- S_i — площадь сечения, m^2 ;
- AB_i — геометрическая жесткость при упругом изгибе, m^4 ;
- CT_i — геометрическая жесткость при упругом кручении, m^4 ;
- XMi — расстояние от оси изгиба до крайних волокон сечения, m ;
- XML — расстояние от оси изгиба до входной кромки лопатки, m ;
- $XL2$ — расстояние от оси изгиба до выходной кромки лопатки, m ;
- $XKPi$ — коэффициент Пуассона;
- SP_i — модуль упругости, МПа;
- IEL — переменная, определяющая характер расчета; для упругого расчета $IEL=1$; для расчета ползучести $IEL=0$;
- IPR — переменная, определяющая режим выдачи результатов расчета; $IPR=1$ — для полной выдачи; $IPR=0$ — выдаются только максимальные прогибы, максимальные напряжения и погрешности решения;
- IVL — величина, определяющая переменность сечения лопаток; для лопаток переменного сечения $IVL=1$; для лопаток постоянного сечения $IVL=0$;
- NVL — переменная, определяющая количество сечений лопатки в случае переменного сечения; в программе принято $NVL \leq 9$;
- k — номер сечения лопатки: $k=1, 2, \dots, NVL$;
- $ZZ(k)$ — расстояние сечения от корня лопатки, m ;
- $SZ(k)$ — площадь сечения, m^2 ;
- $AZ(k)$ — геометрическая жесткость при упругом изгибе, m^4 ;
- $CZ(k)$ — геометрическая жесткость при упругом кручении, m^4 ;

К вычислению напряжений в сварном шве лопатки



Черт. 2

В случае переменного сечения величины SL, ABL, CTL , упомянутые ранее, соответствуют корневому сечению, причем $SZ(1)=SL, AZ(1)=ABL, CZ(1)=CTL$.

Если геометрические характеристики получены по программе, описанной в рекомендуемом приложении 4, то наименование исходных данных для расчета ползучести находится в соответствии с результатами расчета геометрических характеристик, как это показано в табл. 1.

Таблица 1

Данные для расчета ползучести	S	AB	ABP_{ρ}	CT	CP	SZ	AZ	CZ
Результаты расчета геометрических характеристик	SBL	JY	JXP_{ρ}	JT	JTP	SBL	JXP_{00}	JT

Расчет диафрагмы в условиях ползучести основан на степенном законе, при этом может быть использована теория течения или старения. По теории течения исходным будет соотношение

$$\dot{\epsilon}^c = B_1 \sigma^m, \tag{1}$$

- где $\dot{\epsilon}^c$ — скорость деформации ползучести при одноосном растяжении;
- σ — соответствующее нормальное напряжение;
- B_1 — коэффициент ползучести;
- m — показатель ползучести.

Иногда при серийных расчетах удобно соотношение (1) представить в виде:

$$\dot{\epsilon}^c = \frac{10^{-7}}{\sigma_n^m} \sigma^m, \tag{2}$$

где σ — предел ползучести материала, т. е. напряжение, вызывающее за 100 тыс. ч деформацию в 1%.
Для теории старения исходным будет уравнение

$$\epsilon^c = \Omega_i \sigma^m, \quad (3)$$

где ϵ^c — деформация ползучести.

При расчете ползучести для каждого элемента диафрагмы задаются величины:

$XKPi$ — показатель ползучести, который в формулах (1)—(3) обозначается m ;

SPi — коэффициент ползучести (B_{1i}) или предел ползучести (σ_{ni}), $i=1, 2, L$.

Задание B_{1i} или σ_{ni} различается в программе с помощью переменной IWH : если $IWH=1$, то $SPi=B_{1i}$; если $IWH=0$, то $SPi=\sigma_{ni}$.

При использовании теории старения задают $SPi=\Omega_{1i}$.

При расчете ползучести, кроме уже перечисленных данных, необходимы следующие:

$XIZO$ — массив из 5 величин $\mu_k = \frac{1}{m_k}$ (при $k=1, \dots, 5$; $\mu_1=0$; $\mu_2=0,25$; $\mu_3=0,5$; $\mu_4=0,75$; $\mu_5=1$);

$XIZ1, XIZ2, XIZL$ — массивы жесткости при изгибе в условиях ползучести для тела, обода и лопаток соответственно; каждый массив состоит из пяти величин жесткости ABP_{pk} , рассчитанных для μ_k при $k=1, \dots, 5$.

Также требуются получаемые из программы расчета геометрических характеристик CPi — жесткости при пластическом кручении, где $i=1, 2, L$.

Если была заказана неполная выдача ($IPR=0$), то в результате расчета печатаются величины прогибов разъема диафрагмы на различных радиусах:

$WY, W0, W1, W2$ — соответственно на радиусах $RY, R0, R1, R2$.

При расчете ползучести по теории течения эти величины выражают скорость ползучести.

Далее выдаются напряжения:

$SM1$ — максимальные напряжения в теле диафрагмы, МПа;

$SM2$ — максимальное напряжение в ободе диафрагмы, МПа;

$SMI, SM0$ — максимальные напряжения на входной и выходной кромках лопаток соответственно, МПа;

$SMIS, SMOS$ — напряжения в сварных швах на входной и выходной кромках лопаток соответственно, МПа.

Максимальные напряжения в теле и ободе подсчитываются на вертикальной оси диафрагмы, в лопатках — в корневом сечении крайней лопатки (у тела).

Следующие две величины характеризуют точность расчета в процентах:

RA — относительная неуравновешенность сил, приложенных к телу диафрагмы, для главного вектора;
 RB — то же, для главного момента.

Точность расчета зависит от числа разбиений интервала $(0, \pi/2)$ при интегрировании дифференциальных уравнений (это число в программе фиксировано и равно 50) и от показателя ползучести: программа обеспечивает допустимую точность ($RA, RB \leq 5\%$) для показателей ползучести, не превосходящих значения 5,5.

Если заказана подробная выдача ($IPR=1$), то, кроме указанных выше величин, печатаются значения следующих функций угла FI :

FI — полярный угол, отсчитываемый от вертикальной оси диафрагмы, рад;

$V1$ — перерезывающая сила в теле, Н;

$V2$ — перерезывающая сила в ободе, Н;

$T1$ — крутящий момент в теле, Н·м;

$T2$ — крутящий момент в ободе, Н·м;

$YM1$ — изгибающий момент в теле, Н·м;

$YM2$ — изгибающий момент в ободе, Н·м;

$BT1$ — угол поворота сечения тела, рад;

$W1$ — перемещение оси тела, м;

$GM1$ — угол наклона оси тела, рад;

$GM2$ — угол наклона оси обода, рад;

TL — крутящий момент в лопатках, Н·м;

$W2$ — перемещение оси обода, м;

$BT2$ — угол поворота сечения обода, рад;

$ML1$ — изгибающий момент в корневом сечении лопаток, Н·м;

$ML2$ — изгибающий момент в верхнем сечении лопаток, Н·м;

W_{\max} — максимальный для данного угла FI прогиб — прогиб по уплотнению, м;

R — реакция опоры, Н.

3. ЗАПОЛНЕНИЕ БЛАНКОВ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПЕРФОРАЦИЯ

Исходные данные можно писать на любом бланке, имеющем в каждой строке 80 позиций; при перфорации каждой строке будет соответствовать одна целая — 80-колонная перфокарта.

В данной программе используются исходные переменные двух типов: целого и вещественного. Все необходимые переменные целого типа записываются в виде одной десятичной цифры, причем каждой переменной этого типа соответствует одна перфокарта с одной пробивкой в первой колонке. Переменные вещественного типа обязательно должны содержать точку и занимать 10 позиций. Если какая-то из переменных вещественного типа является целым числом, то ее все равно следует записать с десятичной точкой, например переменную вещественного типа $XNL=19$ следует записать в виде

1	9	.							
---	---	---	--	--	--	--	--	--	--

Такие характеристики, как модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^5$, записываются в виде

2	.	1						E	5
---	---	---	--	--	--	--	--	---	---

Выражение $E \pm n$, записанное вслед за числом, означает умножение этого числа на $10^{\pm n}$. Порядок записи исходных данных приводится в табл. 2.

Таблица 2

Номер строки (номер карты)	Идентификаторы исходных величин	Тип
1	Наименование расчета	Текстовый
2	$RY, R0, A1, R1, R2, A2, R3$	Вещественный
3	$XNL, DFI, \theta S, \theta, P$	»
4	$S1, AB1, CT1, XM1, XKP1, SP1$	»
5	$S2, AB2, CT2, XM2, XKP2, SP2$	»
6	$SL, ABL, CTL, XML, XL2, XKPL, SPL$	»
7	IEL	Целый
8	IPR	»
9	IWH	»
10	Пять компонент массива XIZ0	Вещественный
11	» » » XIZ1	»
12	» » » XIZ2	»
13	» » » XIZL	»
14	$CPI, CP2, CPL$	»
15	IVL	Целый
16	NVL	»
17	Компоненты массива ZZ	Вещественный
18	» » SZ	»
19	» » AZ	»
20	» » CZ	»

В конкретном расчете некоторые из приведенных карт могут отсутствовать.

Карты 1—8 и 15 требуются всегда; карты 9—14 — при расчете ползучести; карты 16—20 — при переменном сечении лопаток.

Задание для расчета ползучести в операционной системе ОС ЕС ЭВМ приведено на черт. 3.

Задание для расчета ползучести в операционной системе ОС ЕС ЭВМ

```
//BTDRJ JOB "26-204", "ЦЕИЛИН", CLASS=C, TIME=05, MSGCLASS=A
//GO EXEC PGM=BTDR, REGION=75K, TIME=5
//STEPLIB DD DSN=BTDR4, DISP=SHR, VOL=SER=LIBTV4, UNIT=SYSDA
//GO, FT08F001 DD UNIT=SYSDA, SPACE=(504, 153)
//GO, FT06F001 DD SYSOUT=A
//GO, FT05F001 DD *
```

```
-----
| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛЗУЧЕСТИ |
|-----|
```

//

Черт. 3

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДИАФРАГМЫ

1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

1.1. Основные величины, относящиеся к сечению:

X, Y — произвольно расположенная относительно сечения прямоугольная система координат;
 BT — угол между осью X и осью X', \dots ; ось X' проходит через центр масс сечения параллельно плоскости диафрагмы, образуя правую систему координат с осью Y' , направленной навстречу потоку пара;

X_C, Y_C — координаты центра масс сечения, м;
 BYC — расстояние по оси Y между центром масс и Y_{\max} сечения, м;
 ZBL — расстояние сечения лопатки от корня лопатки, м;
 S — площадь сечения, м²;
 JX — момент инерции сечения относительно оси X' , м⁴;
 JY — момент инерции сечения относительно оси Y' , м⁴;
 JXY — центробежный момент инерции, м⁴;
 JT — геометрическая жесткость при упругом кручении, м⁴.

Для расчета ползучести дополнительно необходимы величины:

JTP — геометрическая жесткость при идеально-пластическом кручении, м³;
 JXP — геометрическая жесткость при идеально-пластическом изгибе относительно оси X' , м³;
 JXP_{μ} — геометрическая жесткость изгиба при ползучести, м³; $\mu = 1/m$ (m — показатель ползучести).

1.2. Для определения геометрических характеристик сечений элементов диафрагмы могут использоваться различные численные методы решения уравнения Лапласа, в частности методы граничной коллокации, конечных элементов и граничных интегральных уравнений. В настоящем стандарте для расчета геометрических характеристик контур сечения представляется в виде последовательности точек, соединенных прямыми отрезками или дугами. Расчет основан на построении семейства вложенных эквидистантных полигонов, которые разбивают сечение на узкие кольца. Такое разбиение позволяет вычислить характеристики, выражающиеся интегралами по сечению, а также построить поверхность равного ската для вычисления JTP . Решение уравнения Лапласа для вычисления JT достигается методом граничной коллокации, причем в качестве координатных функций берутся вещественные и мнимые части комплексной переменной $(x \pm iy)^n$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), граничные условия удовлетворяются в заданном ряде точек на контуре сечения.

1.3. Контур поперечного сечения может быть задан прямолинейными отрезками или дугами (или комбинацией дуг и отрезков). Способ задания определяется переменной:

$MODE=1$ — заданы (x, y) — точки, которые должны соединяться отрезками;

$MODE=2$ — заданы $(x, y, \pm r)$ — точки сопряжения дуг и радиусы, знак (+) у радиуса означает, что центр дуги радиуса лежит справа от дуги; $r=0$ соответствует прямолинейному отрезку; знак (—) — центр лежит слева от дуги;

$MODE=3$ — заданы $(x, y, \pm r, u, v)$ — точки сопряжения, радиусы и центры дуг; избыточность данных используется для контроля;

$MODE=4$ — заданы $(\pm r, u, v)$ — радиусы и центры дуг; для прямолинейного участка задается $(0, 0, 0)$; при этом способе задания контура прямолинейный участок может быть только между двумя дугами и только касателен к ним;

N — число точек, задающих контур.

Контур задается с помощью массива $CONT$, состоящего из пар, троек или пятерок чисел (в зависимости от значения $MODE$). Начало перечисления точек произвольно, направление обхода контура по часовой стрелке; при задании координат ($MODE=1, 2, 3$) координаты (x, y) первой точки задаются дважды: в начале и конце массива $CONT$.

1.4. В расчете используются вспомогательные величины:

$NSBL$ — число сечений лопатки, задается в первом сечении, для тела и обода $NSBL=1$;

M — число точек, на которые в программе разбивается контур при построении эквидистантных полигонов ($N \ll M \leq 400$);

NT — величина, определяющая расстояние H между эквидистантными полигонами ($H = P/NT$, P — периметр сечения; должно быть $NT \geq 2M$);

$J1$ — число точек, на которые подразбивается контур в методе коллокаций, обычно $J1 < M$;

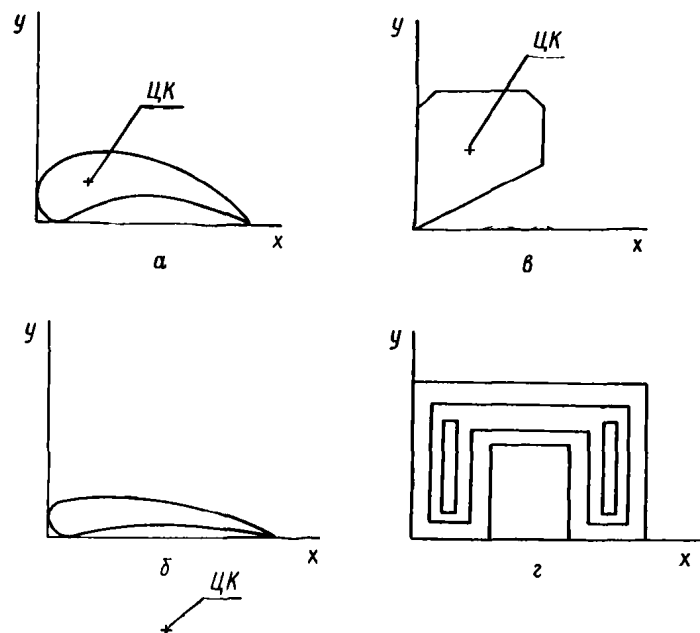
$M1, K1$ — число отрицательных и соответственно положительных степеней $(x \pm iy)^n$ в методе коллокаций;

XK, YK — начало координат для метода коллокаций (центр коллокации), м;
 SCL — масштаб задания координат точек контура и центра коллокации;
 R — величина, характеризующая точность расчета жесткости на кручение JT .

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТА И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

2.1. Для правильной работы программы сечение должно быть таким, чтобы построенные вложенные полигоны не распались на отдельные замкнутые части (черт. 1). Точки массива $CONT$ выбираются таким образом, чтобы образованная из заданных дуг и отрезков линия аппроксимировала контур сечения. Не следует стремиться представить контур во всех подробностях: для сильно изрезанной границы метод коллокации не дает хороших результатов. Стороны заданной границы подразбиваются на более мелкие части. Величины M и NT определяют точность вычисления интегралов по сечению. Для обеспечения точности не более 1% достаточно $M=100, NT=200$.

Поперечные сечения стержней



а, б, в — допустимое; з — недопустимое

Черт. 1

2.2. Центр коллокации (ЦК) для несильно изогнутых сечений принимается вблизи центра масс сечения (см. черт. 1, а, в), для сечений лопаток, похожих на сегмент кольца (см. черт. 1, б), — вблизи центра этого кольца. В соответствии с этим назначаются величины $M1$ и $K1$: в первом случае $M1=0, K1=8$, во втором $M1=K1=4$; если $M1 \neq 0$, то центр коллокации должен быть вне сечения.

Величина R , которая вычисляется в программе, дает представление о точности метода коллокации для заданного сечения. Если известна погрешность вычисления площади, то приближенно можно принять

$$\delta JT = SR + JT \frac{\delta S}{S},$$

где δS — погрешность вычисления площади сечения; δJT — погрешность вычисления жесткости кручения.

Обычно бывает достаточно взять $M=100, NT=200$, чтобы было $\delta S < 1\%$; тогда $\delta JT = SR$. Если полученная точность не удовлетворяет, то можно попытаться увеличить $J1, M1, K1$, если и это не помогает, то необходимо уменьшить изрезанность контура сечения.

3. ЗАПИСЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПЕРФОРАЦИЯ

3.1. Исходные данные для расчета записываются на бланках, имеющих 80 позиций в одной строке. Содержимое каждой строки будет помещено на одну перфокарту.

Для ввода исходных данных используются следующие три группы данных:

- карта с наименованием сечения;
- блок именованного списка $\&H$;
- блок именованного списка $\&POL$.

Содержимое блоков *&H*, *&POL* показано на черт. 2, для некоторых переменных в программе заданы начальные значения, эти переменные указаны с начальными значениями. Если при подготовке задания в блоке данных какая-то из таких переменных опущена, то для нее будет использовано указанное начальное значение.

Блоки именованных списков (*namelist*) в «Фортране» записываются по следующим правилам: все карты должны начинаться с пробела; начало блока обозначается пробитым со 2-й позиции текстом: `□□ & имя блока □□`;

Шаблон исходных данных для расчета геометрических характеристик сечений

```

                НАИМЕНОВАНИЕ СЕЧЕНИЯ
&N M=200, K1=0, M1=0, J1=50, NT=400, XK= , YK= , &END
&POL BT= , SCL=1 , MODE=1, NSBL=1, ZBL=0, N= ,

CONT=X1, Y1, X2, Y2, ...           |
...                                 | ЕСЛИ MODE=1
XN, YN, X1, Y1, &END               |
CONT=X1, Y1, ±R1, X2, Y2, ±R2, ... |
...                                 | ЕСЛИ MODE=2
XN, YN, ±RN, X1, Y1, &END         |
CONT=X1, Y1, ±R1, U1, V1, X2, Y2, ±R2, U2, V2, ... |
...                                 | ЕСЛИ MODE=3
XN, YN, ±RN, UN, VN, X1, Y1, &END |
CONT=±R1, U1, V1, ±R2, U2, V2, ... |
...                                 | ЕСЛИ MODE=4
±RN, UN, VN, &END                 |

```

Черт. 2

далее следует список переменных и массивов, которым присваиваются значения, разделенные запятыми и возможно пробелами; вслед за идентификатором и знаком «=» следует список значений, причем вещественные значения могут задаваться в любой форме, принятой в программах на «Фортране» (с десятичной точкой, с порядком, в виде целого числа);

заканчиваться блок должен символами *&END*.

(Предостережем от частой ошибки: пробелы в пределах чисел, т. е. между знаком «=» и ближайшей запятой, воспринимаются как нули, поэтому пробелы могут следовать за запятыми, но не должны предшествовать запятым, например $n=12 \square$, будет воспринято как $n=120$.)

Данные для сечений элементов диафрагмы должны следовать в порядке: тело, обод, сечения лопаток от тела к ободу, причем указатель числа сечений *NSBL* должен быть задан в первом сечении лопатки.

Для тела и обода порядок задания *NSBL* и *ZBL* безразличен.

4. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОС ЕС ЭВМ И ВЫДАЧА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

4.1. Для печати используется файл 6, на печать выдаются вводимые исходные данные и результаты расчета. Информация, необходимая для последующего расчета диафрагм, выводится в файл 8; можно использовать для файла 8:

печать;

перфокарты;

запись на ленту или диск.

Описание форматов файла 8 приведено в описании расчета диафрагмы (обязательное приложение 2).

Варианты расчета геометрических характеристик для различных диафрагм могут храниться как на картах, так и на диске. При хранении на диске варианты различаются именами, составленными из двух частей: префикса (*PREF*) и варианта (*VAR*); оба параметра можно изменять при обращении к процедуре, стандартные значения $PREF=SN321$, $VAR=1$, так что полное имя будет *SN3211*.

Следует избегать накопления на диске старых, ненужных вариантов, поэтому рекомендуется пользоваться ограниченным набором значений параметра *VAR*, т. е. записывать новые варианты под именем устаревших.

Задание для расчета геометрических характеристик использует процедуру *BTG* во входном потоке, текст процедуры приведен на черт. 3. Процедура состоит из двух шагов. На первом шаге производится удаление старого экземпляра заданного варианта файла 8; если старого экземпляра не было, то первый шаг все равно заканчивается благополучно. На втором шаге процедуры *BTG* выполняется программа расчета геометрических характеристик, выдающая результаты на печать и в заданный вариант файла 8.

Задание для расчета геометрических характеристик с выдачей в файл 8 на диск приведено на черт. 4, для выдачи результатов файла 8 на карты можно использовать задание, приведенное на черт. 5.

Процедура расчета геометрических характеристик

```
//BTG PROC PREF=BT,PROG=DC4,U=5061,V=PTOM01,VAR=1
//SCR EXEC PGM=IEF=R14
//OLDFILE DD DSN=&PREF&VAR,UNIT=&U,VOL=SER=&V,DISP=(OLD,DELETE)
//GO EXEC PGM=&PREF&PROG,REGION=100K
//FT05F001 DD DDNAME=SYSIN
//FT06F001 DD SYSOUT=A,DCB=(RECFM=VBA,LREOL=133,BLKSIZE=3520)
//FT08F001 DD DSN=&PREF&VAR,UNIT=&U,VOL=SER=&V,DISP=(NEW,KEEP),
// SPACE=1000,(8,8),RLSE),DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=800)
// PEND
```

Черт. 3

Задание для расчета геометрических характеристик с выдачей результатов на диск

```
//SN321BTG JOB
-----
| КАРТЫ ПРОЦЕДУРЫ BTG |
|-----|
//G1 EXEC BTG,VAR=2
//GO.SYSIN DD *
-----
| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ |
|-----|
//
```

Черт. 4

Задание для расчета геометрических характеристик с выдачей результатов на карты

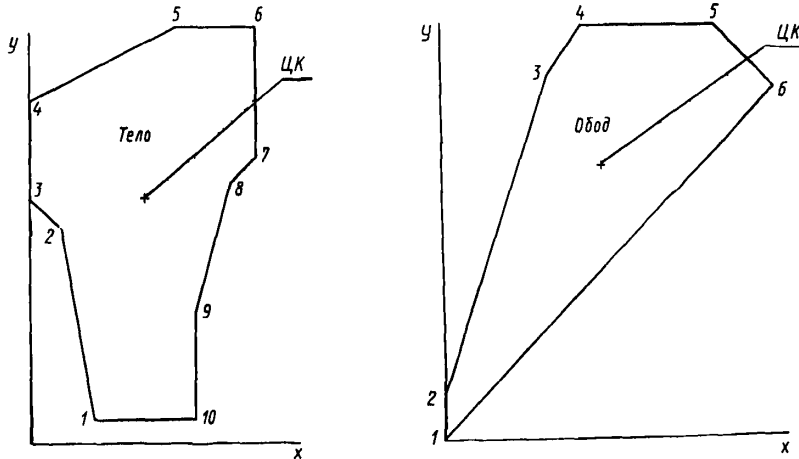
```
//SN321 BTG JOB
-----
| КАРТЫ ПРОЦЕДУРЫ BTG |
|-----|
//G1 EXEC BTG
//GO.FT08F001 DD SYSOUT=B,DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=800)
//GO.SYSIN DD *
-----
| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ |
|-----|
//
```

Черт. 5

ПРИМЕР УПРУГОГО ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ДИАФРАГМЫ**1. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ ДИАФРАГМЫ**

1.1. Поперечные сечения тела, обода и лопаток представлены на черт. 1, 2, 3.

Поперечные сечения тела и обода



Черт. 1

Начало координат метода коллокаций для тела и обода принимается вблизи центра масс их сечений, для лопаток — вне сечения (во втором квадранте). Исходные данные представлены на черт. 4, а результаты — на черт. 5, 6.

2. РАСЧЕТ ДИАФРАГМЫ

2.1. Основные размеры диафрагмы:

$$R_Y = 0,445 \text{ м}; R_0 = 0,455 \text{ м}; R_1 = 0,7235 \text{ м};$$

$$R_2 = 1,1365 \text{ м}; R_3 = 1,3825 \text{ м}; R_4 = 1,400 \text{ м}.$$

Число лопаток в полукольце диафрагмы $XK = 27$.

Перепад давления на диафрагме 0,0185 МПа. Поперечное (к направлению потока) усилие от потока пара в данном примере не учитываем. Таким образом, равномерно распределенная нагрузка на единицу площади тела, обода и лопаток

$$\Theta = 0,0185 \text{ МПа}, \Theta_X = 0,0185 \text{ МПа}.$$

Модули упругости для тела и обода

$$E = 1,06 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

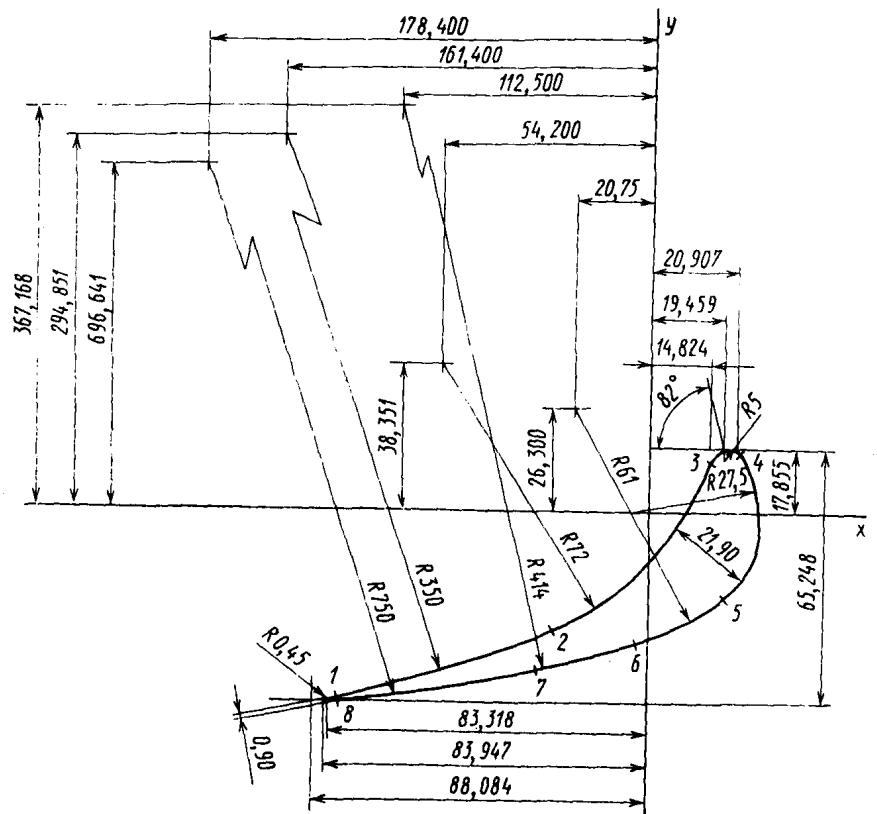
для лопаток

$$E = 2,16 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Корневое сечение лопатки

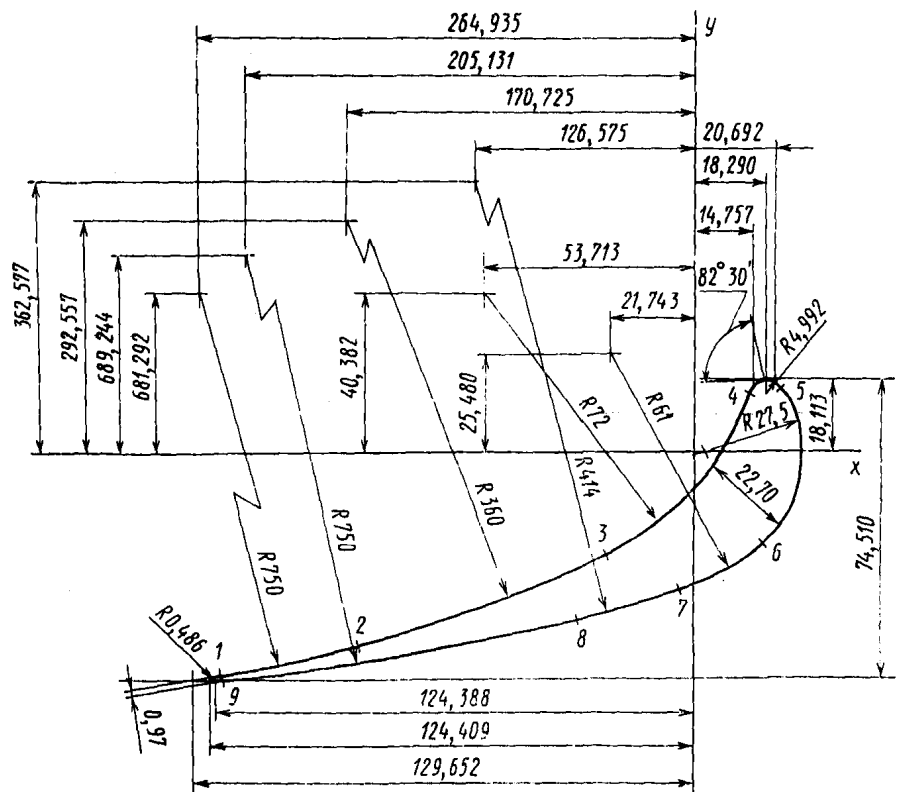
Номер участка	x	y
1	-84,046	-46,528
2	-26,436	-28,081
3	13,741	14,520
4	22,561	15,724
5	17,034	-21,590
6	-4,895	-32,603
7	-31,302	-38,790
8	-83,890	-47,380



Черт. 2

Периферийное сечение лопатки

Номер участка	x	y
1	-124,500	-55,433
2	-82,247	-47,586
3	-23,408	-24,929
4	13,621	14,888
5	-22,346	16,031
6	-17,854	-20,916
7	-3,635	-32,772
8	-29,783	-39,923
9	-124,357	-56,394



Черт. 3

Исходные данные для расчета геометрических характеристик сечений элементов диафрагмы

```

      ТЕЛО
&H M=100, K1=8, J1=100, NT=200,
      XK= 4.5, YK=7.5, &END
&POL BT=90, SCL=50, N=8, CONT=3, 0.25, 3, 3.7, 0.55, 13.4, 3.7, 13.4,
      8.05, 10.7, 8.05, 8.15,
      7.1, 6.7, 6.0, 25, 3, 0.25, &END
      ОБОД
&H M=100, K1=8, J1=100, NT=200,
      XK= 6., YK= 11.4, &END
&POL BT=90, SCL=50, N=9, CONT=9, 3, 0, 5, 5.8, 0.1, 9.8, 0.1, 10.3,
      2.1, 13.2, 6.5, 3.2, 7.5, 11.4, 11, 1.2,
      11, 0, 9.3, 0, &END
      СЕЧЕНИЕ Б-Б ЛОПАТКИ
&H M=100, K1=4, M1=4, J1=100, NT=200, XK=-6, YK=4, &END
&POL BT=0, MODE=3, NSBL=2, ZBL=0, N=8, SCL=100,
      CONT=-8.405, -4.653, -35, -16.14, 29.49, -2.644, -2.81, -7.2, -5.42, 3.835,
      1.374, 1.452, .5, 1.846, 1.286, 2.256, 1.572, 2.75, 0, 0,
      1.703, -2.159, 6.1, -2.075, 2.63, -.49, -3.26, 41.4, -11.25, 36.717,
      -3.13, -3.879, 75, -17.84, 69.664, -8.385, -4.693, .045, -8.332, -4.694,
      -8.405, -4.653, &END
      СЕЧЕНИЕ Ж-Ж ЛОПАТКИ
&H M=100, K1=4, M1=4, J1=100, NT=200, XK=-9, YK=8, &END
*
*
*
*
&POL BT=0, ZBL=41.3, MODE=3, N=9, SCL=100,
      CONT=-12.45, -5.543, -75, -26.499, 68.13, -8.825, -4.759, -35, -17.073, 29.26,
      -2.341, -2.493, -7.2, -5.371, 4.038, 1.362, 1.489, .499, 1.829, 1.312,
      2.235, 1.603, 2.75, 0, 0, 1.785, -2.092, 6.1, -2.175, 2.548,
      -.364, -3.277, 41.4, -12.658, 36.258, -2.978, -3.992, 75, -20.513, 68.1924,
      -12.436, -5.639, .0486, -12.439, -5.591, -12.45, -5.543, &END

```

Черт. 4

Результаты расчета геометрических характеристик сечений тела и обода диафрагмы

```

TELO
&M
H= 100, H1= 0, K1= 0, J1= 100, NT= 200, IN= 0, XK= 4.50000000, YK= 7.50000000
&END
&POLS
MODE= 1, NCONF= 10, N= 0, SCL= 0.50000000, BT= 90.00000000, NSBL= 1, ZBL= 0.0
&END
CONT=
3.00000000 0.25000000 3.00000000 3.69999998 0.54999995
13.40000000 3.69999998 13.40000000 8.04999992 10.70000000
8.04999992 8.14999996 7.09999994 6.69999998 6.00000000
0.25000000 3.00000000 0.25000000
0, 93939
&GM
XC= 8.9960747, YC= 15.001132, SCLC= 1.00000000, BYC= 11.798642, SBL= 243.16231, JX= 11046.371, JY=
2564.1777, JXY= 1081.9421, JZ= 6001.9922, JZP= 514.32031, JXP00= 659.04346, JXP25= 904.87964, JXP50=
1263.3560, JXP75= 1788.9617, JXP100= 2564.1765
&END
OBOA
&M
H= 100, H1= 0, K1= 0, J1= 100, NT= 200, IN= 0, XK= 6.00000000, YK= 11.40000000
&END
&POLS
MODE= 1, NCONF= 20, N= 9, SCL= 0.50000000, BT= 90.00000000, NSBL= 1, ZBL= 0.0
&END
CONT=
9.29999992 0.0 5.00000000 5.79999992 0.99999964E-01
9.79999992 0.99999964E-01 10.2999999 2.09999994 13.20000000
6.50000000 13.20000000 7.50000000 11.40000000 11.00000000
1.19999998 11.00000000 0.0 9.29999992 0.0
0, 57049
&GM
XC= 11.826068, YC= 15.536936, SCLC= 1.00000000, BYC= 10.862890, SBL= 255.98167, JX= 11750.684, JY=
6613.2266, JXY= 6371.4727, JZ= 6077.3047, JZP= 531.60034, JXP00= 1091.0010, JXP25= 1675.8918, JXP50=
2615.5730, JXP75= 4136.0781, JXP100= 6613.2227
&END

```

Результаты расчета геометрических характеристик сечений лопатки

Стр. 28 OCT 108210.01-86

СЕЧЕНИЕ Б-Б ЛОПАТКИ

```

&M
M=      100,MI=      4,KI=      4,JI=      100,NI=      200,IN=      0,JK= -6,00000000      ,YK= 4,00000000
&END
&POLS
MODE=      3,NCNT=      42,N=      0,SC= 1,00000000      ,BT= 0,0      ,NSBL=      2,ZBL= 0,0
&END
CONT=
-8,4049997      -4,6529999      =35,0000000      -16,1399999      29,4899990
-2,6439991      -2,8099995      =7,1999998      -5,4199999      3,8349991
1,3739996      1,4519997      =0,500000000      1,8459997
2,2559996      1,5719995      =2,750000000      0,0
1,7029991      -2,1589994      =6,0999994      -2,0749996      2,6299992
=0,48999995      -3,2599993      41,399994      -11,2500000      36,7169995
-3,1299992      -3,8789997      75,0000000      -17,839994      69,6639986
-8,3849993      -4,6929998      =0,44999998E-01      -8,3319996      =4,6939993
-8,4049997      =4,6529999
0,00704
    
```

```

&GH
XC=-0,31568819      ,YC= -1,7392998      ,SCLC= 1,00000000      ,BYC= 3,5209570      ,SBL= 14,391442      ,JX= 82,464783      ,JY=
35,282730      ,JXY= 45,357285      ,JZ= 11,820742      ,JTP= 5,2688484      ,JXP00= 19,044693      ,JXP25= 21,767014      ,JXP50=
25,261658      ,JXP75= 29,693344      ,JXP100= 35,282730
&END
    
```

СЕЧЕНИЕ X-X ЛОПАТКИ

```

&M
M=      100,MI=      4,KI=      4,JI=      100,NI=      200,IN=      0,JK= -9,00000000      ,YK= 8,00000000
&END
&POLS
MODE=      3,NCNT=      47,N=      0,SC= 1,00000000      ,BT= 0,0      ,NSBL=      1,ZBL= 4,299986
&END
CONT=
-12,4500000      -5,5429993      =75,0000000      -26,4989993      68,1299990
-8,8249998      -4,7589998      =35,0000000      -17,072998      29,2599995
-2,3409996      -2,4929991      =7,1999998      -3,3709993      4,0379992
1,3619995      1,4889994      =0,49899995      1,8289995      1,3119993
2,2349997      1,6029997      =2,750000000      0,0
1,7849998      -2,0919991      =6,0999994      -2,1749992      2,5479994
=0,36399996      -3,2769995      41,399994      -12,6580000      36,2579996
-2,9779997      -3,9919996      75,0000000      -20,5129995      68,9239996
-12,4360000      -5,6389999      =0,48599999E-01      -12,4389999      =3,5909996
-12,4500000      =5,5429993
0,01106
    
```

```

&GH
XC= -1,4281626      ,YC= -2,2066174      ,SCLC= 1,00000000      ,BYC= 4,0054302      ,SBL= 17,966614      ,JX= 211,02345      ,JY=
56,054958      ,JXY= 94,940048      ,JZ= 14,630027      ,JTP= 6,9699150      ,JXP00= 26,594940      ,JXP25= 31,357315      ,JXP50=
37,570602      ,JXP75= 45,622543      ,JXP100= 56,034958
&END
    
```

Температура элементов диафрагмы одинакова, поэтому можно принять $T=0$; коэффициент линейного расширения произвольный.

Число разбиений $1/2$ полукольца диафрагмы выбираем $NS=50$. Считаем лопатки установленными в радиальном направлении $PSI=0$, диафрагма закреплена от сдвига в точке $\varphi=0$ ($IO=0$).

Заказываем режим выдачи напряжений и прогибов в точках $\varphi=\pm 88^\circ$. Запись исходных данных в разделе библиотеки представлена на черт. 7.

Исходные данные для упругого расчета диафрагмы

```

      ДИАФРАГМА
&NR RY=44.50,R0=45.50,R1=72.35,R2=113.65,R3=138.25,R4=140.00,
XK=27, G=0.190, NS=25, &END
&RSL RES=F,F,T,F, NF1=2,F11=-88.88, &END
*
&FBL NB=2,ZF=0.413, QX=0.19, &END
&EDT EY=2*2.21E6, .985E6, EM=3*0.3;
      ЛИНИЯ ОТРЕЗА
&END

```

Черт. 7

Информация о геометрических характеристиках сечений берется с диска из файла 8, полученного в результате предварительного расчета (раздел 1 настоящего приложения).

2.2. Распечатка результатов расчета представлена на черт. 8, 9, 10, откуда, в частности, видно, что максимальный прогиб $w=0,9 \cdot 10^{-3}$ м (0,9 мм) имеет место на краю $\varphi=90^\circ$ диафрагмы.

Максимальные напряжения растягивающие (+), сжимающие (—): в теле (+11) и (—9) МПа, в ободе (+17) и (—11) МПа, в лопатках (+72) и (—60) МПа, причем максимальные растягивающие напряжения имеют место в лопатках у обода, а максимальные сжимающие — в лопатках у тела при $\varphi=-90^\circ$, эти максимумы достигаются вблизи входной кромки лопатки, в точках 18 и 19.

Напряжения при $\varphi=\pm 88^\circ$ меньше максимальных.

Результаты упругого расчета диафрагмы

ОБОД
 NSBL=1BT= 9.0 SCL= 0.500
 КОНТУР: NCONT= 20 CONT=

9.30	0.0	5.00	5.80	0.100E+00	9.60	8.100E+00	10.3
2.10	13.2	6.50	13.2	7.50	11.4	11.0	1.20
11.0	0.0	9.30	0.0				

44

18.630	0.0	17.025	1.4500	16.450	2.9000	15.375	4.3300	14.500	5.8000
13.225	7.2500	12.150	8.7000	11.075	10.150	10.000	11.600	8.6000	12.743
7.2000	13.800	5.0000	15.029	4.0000	16.171	3.0000	17.314	1.6000	18.457
0.19998	19.600	0.19998	20.600	1.2000	22.050	2.2000	23.500	2.2000	24.950
4.2000	26.400	5.9600	26.400	7.7200	26.400	9.4800	26.400	11.240	26.400
13.000	26.400	13.667	25.200	14.333	24.000	15.000	22.800	15.583	21.000
16.167	19.400	16.750	17.700	17.333	16.000	17.917	14.300	18.500	12.600
19.083	10.900	19.667	9.1999	20.250	7.4999	20.833	5.7999	21.417	4.0999
22.000	2.3999	22.000	1.1999	22.000	-0.10395E-03	20.300	-0.10395E-03		

EGH
 XC= 11.826068 YC= 15.336936 SCLC= 1.0000000 BYC= 10.862889 ZBL= 0.0 SBL= 255.98166 JX= 11750.604 JY= 6613.2266 JXY= 6371.4727 JT= 6077.3047 JTP= 531.60010 JXP= 0.61405753E-53 JXP00= 1091.0010 JXP25= 1675.0916 JXP50= 2615.5730 JXP75= 4136.0742 JXP100= 6613.2227

СЕЧЕНИЕ Б-Б ЛОПАТКИ
 NSBL=2BT= 0.0 SCL= 1.00
 КОНТУР: NCONT= 42 CONT=

-8.40	-4.65	-35.0	-16.1	29.5	-2.64	-2.81	-7.20
-5.42	3.03	1.37	1.45	5.00	1.05	1.29	2.26
1.57	2.75	0.0	0.0	1.70	-2.14	6.10	-2.27
2.63	-0.490	-3.26	41.4	-11.3	36.7	-3.13	-3.88
75.0	-17.8	69.7	-8.38	-4.69	0.450E-01	-0.53	-4.69

42

-8.4000	-4.6510	-7.6686	-4.4775	-6.9362	-4.2062	-4.2000	-4.0790	-5.4046	-5.8562
-4.7661	-3.6177	-4.0529	-3.3630	-3.3455	-3.0945	-2.6439	-2.8100	-1.9648	-2.4833
-1.3234	-2.0074	-0.7270	-1.6266	-0.1820	-1.1061	0.30559	-0.55134	0.73044	0.91198E-01
1.0819	0.75473	1.3740	1.4520	1.6055	1.7240	1.9600	1.7730	2.2560	1.5720
2.5766	0.96003	2.7346	0.20747	2.7199	-0.40324	2.5336	-1.0685	2.1073	-1.6663
1.7030	-2.1500	1.1995	-2.5163	0.66244	-2.8209	0.07350E-01	-3.0696	-0.48999	-3.2600
-1.1460	-3.4309	-1.8048	-3.5911	-2.4662	-3.7404	-3.1290	-3.8790	-3.8769	-4.0181
-4.5253	-4.1496	-3.3749	-4.2735	-6.1258	-4.3090	-6.8770	-6.4985	-7.6300	-4.5995
-0.3849	-4.6910	-8.4003	-4.6757						

EGH
 XC= -0.31568013 YC= -1.7392990 SCLC= 1.0000000 BYC= 3.5209570 ZBL= 0.0 SBL= 14.391441 JX= 82.464783 JY= 35.280715 JXY= 45.357285 JT= 11.020742 JTP= 5.2680475 JXP= 0.61405753E-53 JXP00= 19.044693 JXP25= 21.767014 JXP50= 25.261650 JXP75= 29.693329 JXP100= 35.282715

СЕЧЕНИЕ К-Ж ЛОПАТКИ
 NSBL=1BT= 0.0 SCL= 1.00
 КОНТУР: NCONT= 47 CONT=

-12.4	-5.54	-95.0	-26.5	60.1	-8.02	-4.76	-35.0
-17.1	29.3	-2.34	-2.49	-7.20	-5.37	4.04	1.36
1.49	0.499	1.03	1.31	2.23	1.60	2.75	0.0
0.0	1.78	-2.09	6.10	-2.17	2.55	-0.364	-3.20
41.4	-12.7	36.3	-2.98	-3.99	75.0	-20.5	68.9
-12.4	-5.64	0.486E-01	-12.4	-5.50	-12.4	-5.54	

EGH
 XC= -1.4281626 YC= -2.2266174 SCLC= 1.0000000 BYC= 4.0054293 ZBL= 41.299900 SBL= 17.966614 JX= 211.02344 JY= 55.034958 JXY= 94.040033 JT= 14.630827 JTP= 6.369914 JXP= 0.61405753E-53 JXP00= 26.594925 JXP25= 31.357300 JXP50= 37.570587 JXP75= 43.622528 JXP100= 56.034958

Результаты упругого расчета диафрагмы

FI	В ТЕЛЕ				МАКСИМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБОДЕ				В ЛОПАТКАХ У ТЕЛА				В ЛОПАТКАХ У ОБОДА		FI	
	ALFA	SIGMA	ALFA	SIGMA	ALFA	SIGMA	ALFA	SIGMA	ALFA	SIGMA	ALFA	SIGMA	ALFA	SIGMA		ALFA
	3.600	-25.200	30.400	75.600	90.000	-90.000	-90.000	-90.000	90.000	-90.000	90.000	-90.000	-79.200	79.200		
ALFA	27.000	1.000	41.000	16.000	26.000	18.000	19.000	27.000	19.000	27.000	19.000	27.000	27.000	27.000	ALFA	
SIGMA	01.041	-63.104	040.062	-117.117	373.67	-459.97	570.91	-284.25	570.91	-284.25	570.91	-284.25	570.91	-284.25	SIGMA	

FI	МАКСИМАЛЬНЫЕ ПРОГИБЫ			
	WY	W0	W1	W2
W	0.1054	0.1052	0.0981	0.0193

FI = -00.000	WY	W0	W1	W2	AS11	AS21	AS31	AS41	AS12	AS22	AS32	AS42	AN11	AN21	AN31	AN41	AN12	AN22	AN32	AN42	SZ11	SZ21	SZ31	SZ41	SZ12	SZ22	SZ32	SZ42
	0.1045	0.1043	0.9671E-01	0.1822E-01	250.3	42.01	42.01	250.3	293.6	66.39	307.8	160.7	1.000	27.00	27.00	1.000	1.000	29.00	41.00	16.00	-1.292	0.8423	0.8423	-1.292	-7.235	33.70	15.10	-45.00
					199.8	312.1	33.60	60.99	197.0	52.65	24.26	337.1	1.000	28.00	22.00	18.00	43.00	19.00	23.00	27.00	-109.3	357.8	-70.39	-459.7	349.6	556.7	45.17	-271.7

FI = 00.000	WY	W0	W1	W2	AS11	AS21	AS31	AS41	AS12	AS22	AS32	AS42	AN11	AN21	AN31	AN41	AN12	AN22	AN32	AN42	SZ11	SZ21	SZ31	SZ41	SZ12	SZ22	SZ32	SZ42
	0.9766E-01	0.9726E-01	0.8658E-01	0.1859E-01	250.3	250.3	42.01	97.70	293.6	66.39	307.8	160.7	1.000	1.000	27.00	21.00	1.000	29.00	41.00	16.00	1.000	1.000	-0.5739	-1.015	-4.481	32.37	17.81	-47.11
					199.8	243.9	33.60	60.99	197.0	52.65	24.26	314.8	1.000	31.00	22.00	18.00	43.00	19.00	23.00	28.00	154.3	243.5	-120.7	-367.5	77.81	526.4	116.6	-203.4

Черт. 10

ПРИМЕР ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ПОЛЗУЧЕСТИ

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1.1. Основные размеры диафрагмы:

$RY=0,367$ м; $RO=0,383$ м; $A1=0,47$ м; $R1=0,551$ м; $R2=0,653$ м; $A2=0,686$ м; $R3=0,696$ м.

Число лопаток в половине диафрагмы $XNL=19$. Считаем, что крайняя лопатка занимает угол $\pi/19=0,165$ рад. Перепад давления $\Theta=0,58$ МПа.

1.2. Тело и обод диафрагмы выполнены из стали марки 12Х1МФ, лопатки — из стали марки 15Х11МФ.

Температура диафрагмы 520°C .

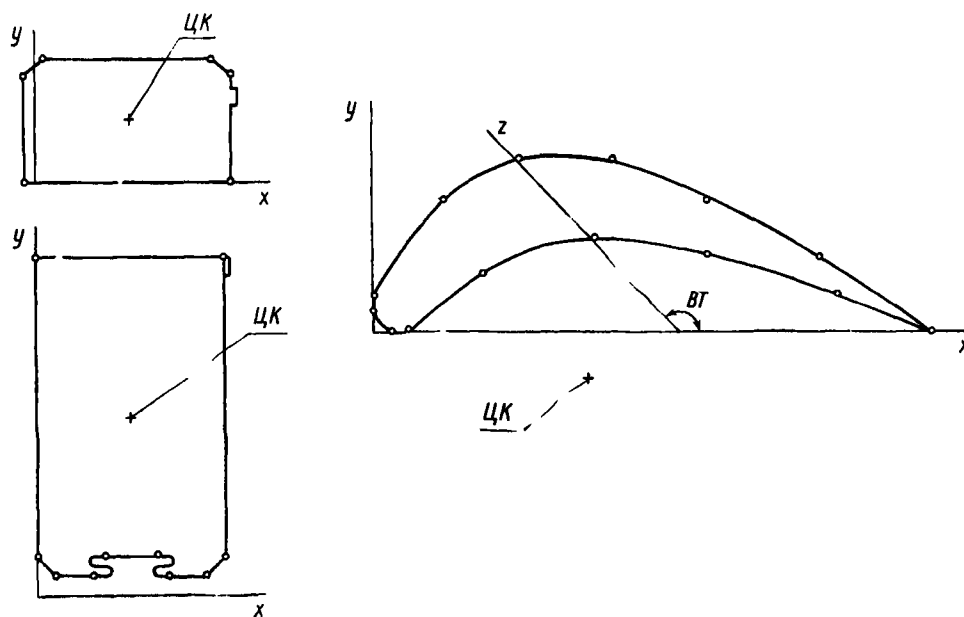
Физические характеристики этих сталей при $t=520^\circ\text{C}$ приведены в таблице.

Сталь	E , МПа	m	Ω_1
12Х1МФ	$1,77 \cdot 10^5$	1,2	$0,79 \cdot 10^{-5}$
15Х11МФ	$1,84 \cdot 10^5$	1,5	$0,235 \cdot 10^{-5}$

Примечание. Показатель ползучести m и коэффициент ползучести Ω_1 рассчитаны по теории старения на 100 тыс. ч.

1.3. Поперечные сечения элементов диафрагм приведены на черт. 1, по ним составлены исходные данные для расчета геометрических характеристик (черт. 2).

Поперечные сечения тела, обода и лопатки



Черт. 1

Результаты расчета геометрических характеристик сечений приведены на черт. 3. Выбирая из этого расчета необходимые величины (на черт. 3, 4 они подчеркнуты), формируем данные для расчета ползучести (см. черт. 4).

Исходные данные для расчета геометрических характеристик

```

ТЕЛО
&N M=100,K1=8,J1=100,NT=200,
  XK= 2,5,YK=4,7, &END
&POL BT=90,SCL=0,5,N=10,CONT=0,1, 0,9, 5,9, 5,1, 4,5,0, 3,5,0,5,
  3,2,1, 1,8,1, 1,5,0,5, 0,5,0, 0,1, &END
ОБОД
&N M=100,K1=8,J1=100,NT=200,
  XK=2,5,YK= 1,6, &END
&POL BT=90,SCL=0,5,N=6,CONT=-,3,0, -.3,2,8, .2,3,3, 4,7,3,3,
  5,2,2,9, 5,2,0, -.3,0, &END
СЕЧЕНИЕ ЛОПАТКИ
&N M=100,K1=4,M1=4,J1=100,NT=200,XK=7, YK=-2,&END
&POL BT=136,NSBL=1,ZBL=0,N=14,
  CONT= 0,1,5, 0,1, 2,3,5, 4,4,6, 6,5,4,5, 9,3,5, 12,2, 15,0,
  12,5,1, 10,2, 6,2,5, 3,1,5, 1,0, 0,5,0, 0,1,5, &END

```

Черт. 2

1.4. Результаты расчета ползучести приведены на черт. 5. По сравнению с полной распечаткой здесь опущены промежуточные приближения.

1.5. В результате расчета получаем остаточный прогиб за 100 тыс. ч $W_0=0,36$ см. Напряжения имеют следующие значения:

$$SM1=-46 \text{ МПа}; \quad SM2=-38 \text{ МПа}; \quad SM1=-118 \text{ МПа}; \quad SM0=103 \text{ МПа}; \quad SM1S=-123 \text{ МПа}; \\ SMOS=107 \text{ МПа}.$$

Характеристики точности:

$$RA=-0,29\%; \quad RB=-0,02\%.$$

ПЕРЕЧЕНЬ ДОКУМЕНТОВ, НА КОТОРЫЕ ДАНЫ ССЫЛКИ В ТЕКСТЕ ОСТ 108.210.01—86

Обозначение документа	Наименование документа	Номер пункта стандарта
ГОСТ 5632—72	Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки и технические требования	Приложение 1
ОСТ 108.021.04—78	Турбины паровые стационарные. Диафрагмы сварные, аппараты направляющие. Общие технические условия	Вводная часть; 1.9; 1.12
РТМ 24.020.15—73	Металлы турбин атомных электростанций	1.9
И 34—70—010—84	Инструкция по наблюдению и контролю за металлом котлов, турбин и трубопроводов	1.10
Положение СЦНТИ ОРГРЭС	Положение о порядке установления сроков дальнейшей эксплуатации котлов, турбин и паропроводов, проработавших свыше 100 тыс. часов	1.11

СО Д Е Р Ж А Н И Е

1. Общие положения	1
2. Типовой расчет	3
Приложение 1. Примеры типового расчета	8
Приложение 2. Поверочный упругий расчет	12
Приложение 3. Поверочный расчет ползучести	16
Приложение 4. Расчет геометрических характеристик поперечных сечений элементов диафрагмы	20
Приложение 5. Пример упругого поверочного расчета диафрагмы	24
Приложение 6. Пример поверочного расчета ползучести	33

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ОСТ 108.210.01—86

Изм.	Номера листов (страниц)				Номер документа	Подпись	Дата	Срок введения изменения
	измененных	замененных	новых	аннулированных				

Редактор *Г. Д. Семенова*Технический редактор *А. Н. Крупенева*Корректор *Л. А. Подрезова*

Сдано в набор 06.05.87.

Подписано к печ. 26.11.87.

Формат бум. 60×90¹/₈.

Объем 5 печ. л.

Тираж 200.

Заказ 477.

Цена 1 руб.