

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт им. С.П.Королева

Б.М.АРОНОВ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРА ЛОПАТОК
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН**

**Пособие по курсовому и дипломному
проектированию**

**Утверждено
редакционным
советом института
18 марта 1969 года**

Куйбышев - 1970

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для выполнения проектов по курсам «Теория и расчет лопаточных машин» и «Конструкция авиационных двигателей» а также для дипломного проектирования.

Исходными данными для проектирования пера (профилирования) лопаток служат материалы, полученные в результате расчета газодинамических и основных геометрических параметров турбины, выполняемого по любому из известных методов.

Учитывая разный уровень требований к объем курсового и дипломного проекта, при обращении к авторам можно воспользоваться следующими рекомендациями, безусловно согласованными в каждом случае с руководителем проекта.

При курсовом проектировании по теории лопаточных машин достаточно ограничиться построением профилей в характерных сечениях соплового аппарата и рабочего колеса одной ступени турбины (глава I, § 1-5), не предъявляя к этим сечениям строгих требований по прочности. При выполнении курсового проекта по конструкции турбины проектируется полностью либо сопловая (глава II), либо рабочая (глава III) лопатки по одной из схем, описанных в этих главах, с проведением расчетов на прочность (гл. I, § 6).

В дипломном проекте турбины проектируется сопловая и рабочая лопатки полностью. В рабочий чертёж лопаток координаты профилей вносятся после проверки их на прочность (глава III, § 15).

Знакомство с материалами главы IV будет полезным как при курсовом, так и при дипломном проектировании.

В выполнении приведенных в главе IV примеров, а также в подготовке всего пособия автору оказали помощь сотрудники института В.А. Грибов и В.И. Кулемова.

При работе над пособием автор учел указания и советы редактора к.т.н. доцента А.С. Наталевича. В окончательной редакции пособия учтены замечания и пожелания рецензентов д.т.н. профессора К.В. Холщевникова и к.т.н. доцента О.Н. Емина.

Всем названным товарищам автор приносит искреннюю благодарность.

Отв. редактор — канд. техн. наук доцент А.С. Наталевич.
Рецензенты — докт. техн. наук проф. К.В. Холщевников,
канд. техн. наук доцент О.Н. Емин.

Редактор И.С. Колышева

Корректор Е.П. Михайлова

Подписано в печать 16.III.70г., ЕО 00169. Формат 60x84^{1/16}.

Объем 10,5 печ. л. Тираж 1000 экз. Цена 60 коп.

Ротапринт тип. им. Мяги, г. Куйбышев, ул. Венцева, 60.

Заказ № 2861.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	4
<u>Глава I.</u> ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОНФУЗОРНОЙ РЕШЕТКИ,...	10
§ 1. Методы построения профилей турбинных решеток	10
§ 2. Оценка значений основных геометрических параметров профиля и решетки	14
§ 3. Кривые для образования контуров профиля. Инструмент для графических построений	20
§ 4. Метод построения конфузорной решетки, профилей	24
§ 5. Контроль межпрофильного канала	30
§ 6. Определение геометрических характеристик профилей...	33
<u>Глава II.</u> ПРОФИЛИРОВАНИЕ СОПЛОВЫХ ДОПАТОК.....	41
§ 7. Подготовительные работы	41
§ 8. Выбор схемы конструкции лопаток. Проектирование пера некрученной лопатки постоянного профиля	46
§ 9. Профилирование лопаток с выходной кромкой, перпенди- кулярной оси турбины.	49
§ 10. Профилирование лопаток с выходной кромкой, наклонной к оси турбины	53
§ 11. Определение сил, действующих на лопатки, и расчет на прочность	55
<u>Глава III.</u> ПРОФИЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ДОПАТОК.....	61
§ 12. Подготовительные работы	61
§ 13. Последовательность работ при проектировании пера от- дельными сечениями.....	66
§ 14. Профилирование с применением технологичных поверхнос- тей пера	80
§ 15. Аналитический метод проверки плавности контуров про- филей	86
<u>Глава IV.</u> ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРА ДОПАТОК.....	96
§ 16. Примеры профилирования сопловых лопаток	96
§ 17. Пример профилирования рабочей лопатки.....	123
ЛИТЕРАТУРА	166
ПРИЛОЖЕНИЕ	169

В В Е Д Е Н И Е

Под профилированием лопатки понимают графическое построение или расчет формы рабочей части лопаток — пера. Перо — это элемент лопатки, который взаимодействует с газом, проходящим через проточную часть венца соплового аппарата или колеса. Форма пера должна быть такой, чтобы в результате указанного взаимодействия поток получил заданное расчетом изменение вектора скорости на каждом радиусе. К перу лопатки предъявляются также требования прочности и технологичности.

Профилирование лопаток (проектирование его пера) сводится к построению сечений пера (на нескольких контрольных радиусах), обычно равно расположенных по высоте проточной части. Совокупность всех этих сечений и создает форму пера.

Для профилирования лопаток необходимо иметь следующие исходные данные:

1. Профиль проточной части турбины в меридиональном сечении (тракт).
2. Газодинамический расчет турбины (расчет треугольников скоростей в нескольких сечениях).

Основным элементом проектирования как сопловых, так и рабочих лопаток является построение профилей плоских решеток. Под решеткой понимают совокупность одинаковых профилей, одинаковым образом установленных друг относительно друга. Цилиндрические сечения лопаток осевых турбин, будучи развернутыми на плоскость, представляют собой профили, образующие, как правило, сужающиеся

каналы. Решетки с сужающимися каналами - конфузурные.

В главе I настоящего пособия излагается метод построения профилей конфузурной решетки, общий для всех (неподвижных и подвижных) лопаток. В последующих главах рассмотрены особенности проектирования каждой из них. Заключительная глава содержит примеры профилирования.

В работе приняты следующие обозначения основных элементов профиля и решетки (рис.1)^{*)} и ступени турбины (рис.2).

Элементы профиля

Корыто - вогнутая часть профиля;

спинка - выпуклая часть профиля;

скелетная линия - геометрическое место центров окружностей, вписанных в контур профиля;

r_1 - радиус окружности, образующей входную кромку;

r_2 - радиус окружности, образующей выходную кромку;

β - хорда профиля - расстояние между наиболее удаленными точками профиля;

d_m - максимальная толщина профиля;

\bar{X}_{d_m} - относительное положение максимальной толщины профиля

$$\bar{X}_{d_m} = \frac{X_{d_m}}{\beta};$$

ω_1 - входной угол заострения - угол между касательными к корыту и спинке в точках сопряжения их с входной кромкой;

ω_2 - выходной угол заострения.

Элементы решетки

Фронт решетки - прямая, соединяющая одноименные точки профилей;

s - ширина решетки;

t - шаг решетки - расстояние между одноименными точками двух соседних профилей;

^{*)} На рис.1 приведены обозначения применительно к решетке профилей рабочей лопатки.

^{**) или средняя.}

- \bar{t} - относительный шаг, $\bar{t} = \frac{t}{\delta}$;
- β, α - углы в решетке, составленной из профилей соответственно рабочей и сошковой лопаток;
- $\beta_{1сп}, \beta_{1кор}$ - угол между фронтом и касательными к входной кромке в точке сопряжения ее соответственно со спинкой или корытом;
- $\beta_{1к}(\alpha_{0к})$ - конструктивный угол входа $\beta_1 = \frac{\beta_{1сп} + \beta_{1кор}}{2}$;
- $\beta_1(\alpha_0)$ - угол входа - угол между фронтом и направлением потока на входе в решетку;
- i - угол удара (угол атаки), $i = \beta_{1к} - \beta_1$;
- $\beta_{2сп}, \beta_{2кор}$ - угол между фронтом и касательными к выходной кромке в точке сопряжения ее соответственно со спинкой или корытом;
- $\theta_{сп}, \theta_{кор}$ - угол кривизны контура, например,
 $\theta_{сп} = 180^\circ - (\beta_{1сп} - \beta_{2сп})$;
- $\beta_{2к}(\alpha_{1к})$ - конструктивный угол выхода, $\beta_{2к} = \frac{\beta_{2сп} + \beta_{2кор}}{2}$;
- $\beta_2(\alpha_1)$ - угол выхода - угол между фронтом и направлением потока на выходе из решетки;
- a_2 - минимальное расстояние между соседними профилями в решетке, "горло" канала;
- $\beta_{2эф}(\alpha_{1эф})$ - эффективный угол выхода - угол, определяемый соотношением $\beta_{2эф} = \arcsin \frac{a_2}{t}$;
- $\Delta \beta_2(\Delta \alpha_1)$ - отклонение (девиация) потока на выходе,
 $\Delta \beta_2 = \beta_2 - \beta_{2эф}$;
- δ - угол отгиба выходной кромки - угол между касательными к контуру спинки в горле и в точке сопряжения спинки с радиусом выходной кромки;
- γ - угол установки профиля - угол между хордой профиля и фронтом решетки;
- K - степень конфузурности решетки, $K = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2}$;
- θ - угол поворота потока, $\theta = 180^\circ - (\beta_2 + \beta_1)$;
- $\psi_{1-н}, \psi_{нр}(\psi_{нр})$ - коэффициенты скорости, $\psi_{нр} = \frac{\omega_{нр}}{\omega_{2ад}}$;

ЭЛЕМЕНТЫ СТУПЕНИ (СМ.РИС.2)

С.А. - венец соплового аппарата - решетка из неподвижных лопаток;

Р.К. - венец рабочего колеса - решетка из подвижных лопаток, устанавливаемых в диск;

0-0 - расчетное сечение перед ступенью;

I-I - то же в осевом зазоре;

2-2 - то же за ступенью;

$D_{пер}$ - периферийный (наружный) диаметр;

$D_{вн}$ - втулочный (внутренний) диаметр;

$D_{ср}$ - средний диаметр, $D_{ср} = \frac{D_{пер} + D_{вн}}{2}$;

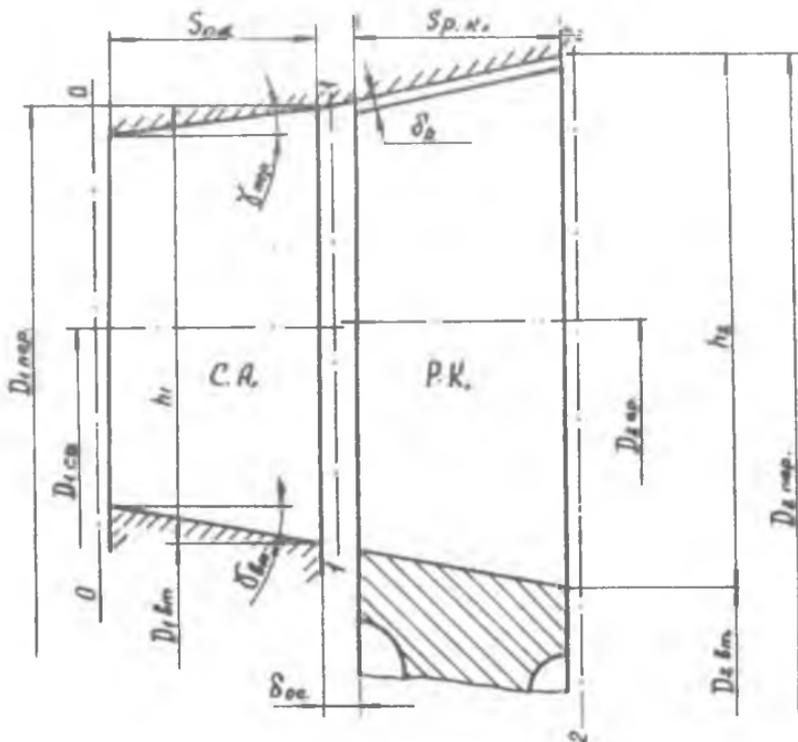


Рис. 2.

- h - высота проточной части в контрольном сечении;
 h_{cp} - средняя высота лопатки, для рабочей лопатки $h_{cp} = \frac{h_1 + h_2}{2}$;
 δ_p - радиальный зазор;
 S - ширина венца;
 δ_{oc} - осевой зазор;
 $\gamma_{пер}$ - угол конусности периферийной поверхности тракта;
 $\gamma_{вгм}$ - угол конусности втулочной поверхности тракта;
 $F_{ос}$ - осевая площадь проточной части

$$F_{ос} = \frac{\pi}{4} (D_{пер}^2 - D_{вгм}^2) ;$$

- $F_{пер}$ - площадь проекции на плоскость, перпендикулярную оси турбины, периферийной конической поверхности, ограничивающей венец. Например, для рабочего колеса

$$F_{пер} = \frac{\pi}{4} (D_{2пер}^2 - D_{1пер}^2) ;$$

- $F_{вгм}$ - аналогичная площадь втулочной поверхности.

Г л а в а I

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОНФУЗОРНОЙ РЕШЕТКИ

§ I. Методы построения профилей турбинных решеток

Задача о проектировании профиля турбинной решетки может быть сформулирована следующим образом:

Зданы: скорость потока, угол входа его в решетку и выхода из нее (β_1 и β_2), располагаемый перепад давления (или соответствующее значение $\lambda_{2\text{од}}$), характерный линейный размер решетки (например ее шаг t), радиус выходной кромки r_2 , а также значение его геометрической характеристики (например, площади f), определенное из условия прочности.

Требуется построить профиль решетки, в которой заданный поворот потока осуществлялся бы с малыми потерями энергии.

Если отбросить требования о соблюдении таких характеристик профиля, как его площадь, положение центра тяжести, момент сопротивления и т.п., то стояла бы задача о получении профиля решетки исходя лишь из требований благоприятного с аэродинамической точки зрения обтекания. Такая задача, называемая в гидромеханике обратной, имеет теоретическое строгое решение. Методы решений основаны на трудах Н.Е.Жуковского и С.А.Чаплыгина. Из современных ученых плодотворно работают в этом направлении Л.И.Седов, Л.А.Симонов, Г.Ю.Степанов [1], М.И.Жуковский [2] и др.

При решении обратной задачи по методу [1] исходным является годограф скорости - геометрическое место концов векторов скорости

ти потока в точках контуров профиля, который необходимо построить. Форма годографа выбирается заранее исходя из требования обеспечить безотрывное обтекание по спинке и корыту. Для профилей конфузурных решеток это требование соблюдается при увеличении скорости вдоль контуров от входной кромки к выходной.

Теоретические методы построения профилей, широко используемые в решении ряда исследовательских задач, при проектировании профилей лопаток турбин авиационных двигателей не всегда могут быть применены.

То, что на профиль лопатки накладываются требования не только газодинамические, но и прочностные, а для пера в целом - и технологические, - не позволяет создать метод профилирования лопаток в классической постановке. Поэтому инженеры, которым предстояло проектировать турбины, вынуждены были, опираясь на теоретические и экспериментальные исследования, создавать конструкции лопаток полумпирическим путем. И в этом отношении достигнут немалый успех: турбины современных двигателей обладают высокими значениями коэффициентов полезного действия, прочны и надежны в эксплуатации, лопатки достаточно технологичны в изготовлении.

Инженерные методы построения профилей могут быть разделены на две группы:

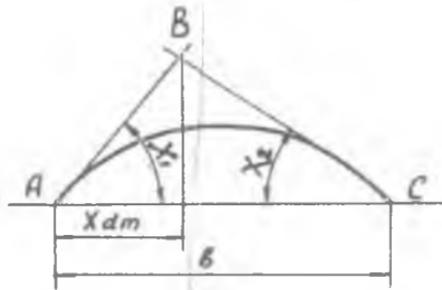
1. Методы, основанные на построении профилей решетки путем изгиба специального аэродинамического профиля.
2. Методы, предусматривающие образование профиля непосредственным построением контуров спинки и корыта.

Первый путь идентичен применяемому в компрессоростроении. Построение профиля состоит здесь из двух этапов: построение средней линии изогнутого профиля; образование контуров профиля - «наращивание» выбранного аэродинамического профиля на среднюю линию.

Методы построения профилей турбинных решеток, относящиеся к первой группе, изложены в работах Московского авиационного института, а также в работах И.Е.Саламатина из КИАИ. На рис.3, заимствованном из пособия К.В.Холщевникова и О.Н.Миша [3], иллюстрируются этапы построения профиля турбинной решетки путем изгиба симметричного аэродинамического профиля.

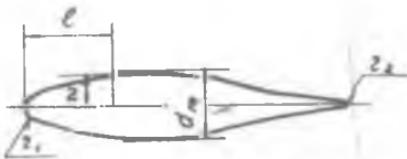
Как показала практика, контуры полученных таким путем профилей под влиянием требований к межпрофильному каналу решетки, к положе-

а) Построение средней (скелетной) линии при известных величинах хорды β и углах $\chi_1 = \theta_k - \chi_2$ и $-\frac{\beta}{2} [1 - 2(1 - 2\chi dm)]$. Средняя линия изгибается по параболе (см. рис. 4, б).



б) "Наращивание" аэродинамического профиля на среднюю линию.

Симметричный профиль



Изогнутый профиль



Изогнутый профиль установлен в решетке под углом $\gamma = \beta_{2k} + \chi$

Рис. 3.

нию центра тяжести сечения лопатки, технологичности поверхностей корыта и спинки и другими, приходится корректировать. Таким образом, в окончательном варианте контуры изогнутого профиля уже не соответствуют контурам исходного аэродинамического профиля.

Построение профиля методами второй группы может быть условно расчленено также на два этапа:

а) предварительная оценка геометрических параметров профиля и решетки ($\beta_{1к}, \beta_{2к}, \beta_{2эф}, b, d_m, z_1, \bar{x}_{dм}, \delta, \omega_1, \omega_2, \gamma$) и установление таким образом границ контуров профиля в решетке;

б) построение контуров спинки и корыта таким образом, чтобы было обеспечено расчетное значение "горла" решетки $d_2 = t \sin \beta_{2эф}$, входная кромка располагалась относительно выходной в соответствии с углом γ , а толщина профиля d_m была удалена от входной кромки на расстояние $\bar{x}_{dм} \cdot \delta$.

При образовании контуров можно использовать различные плавные кривые: параболы [4,5], гиперболы [6], лемнискаты Бернулли [7]; используют также дуги окружностей и отрезки прямых линий. Для практического построения удобно применение лекал.

При выборе кривых для очерчивания профилей обращается внимание главным образом, на то, чтобы кривизна контура монотонно уменьшалась от входной кромки к выходной и чтобы не было скачков кривизны, особенно на контуре спинки. Несоблюдение последнего требования может привести к отрыву потока и повышению профильных потерь [1,8].

При образовании контуров спинки и корыта целесообразно использовать сочетание дуг окружностей и гиперболических спиралей, сопрягаемых без скачка кривизны [9].

Каким бы из инженерных методов ни был построен профиль, должны быть определены его характеристики, определяющие прочность (площадь, положение центра тяжести, моменты инерции и сопротивления). Если фактическое значение заданной, например, площади отличается от требуемого, - профиль перестраивается при скорректированном значении толщины.

Кроме контроля геометрических характеристик профиля, проверяется канал, образуемый двумя соседними профилями решетки. Канал считается удовлетворительным, если он плавно сужается от входа в решетку к выходу из нее.

Контроль качества обтекания может быть осуществлен современными-

ми теоретическими методами решения так называемой прямой задачи. Под последней подразумевается определение эшеры скоростей потока на контурах заданного профиля решетки при известных условиях натекания на нее. Расчет эшеры скоростей используется при расчете пограничного слоя, коэффициентов профильных потерь, а также для контроля соблюдения условий безотрывного обтекания. С методами решения прямой задачи можно познакомиться, например, в [1,2,10,11].

Как показали исследования, многие турбинные решетки, спроектированные современными инженерными методами, имеют благоприятное распределение скорости по контурам и малые профильные потери.

В данном пособии излагается один из инженерных методов построения профиля, относящийся ко второй группе методов. Такой выбор обоснован, с одной стороны, более широким применением их в практике конструкторских бюро и, с другой - недостатком освещения в специальной и учебной литературе.

§ 2. Оценка значений основных геометрических параметров профиля и решетки

На основе литературных данных, а также опыта профилирования, при проектировании конфузورных решеток следует соблюдать следующие рекомендации:

1. Конструктивный угол входа $\beta_{1к}$ выбирается меньше угла β_1 на $2+3^\circ$ так, чтобы поток поступал в решетку под небольшим углом удара в спинку ($i < 0$). Как правило, при таких условиях решетки профилей имеют максимальные коэффициенты скоростей Ψ_{np} . Исключения составляют решетки с малой степенью конфузорности, т.е. решетки, близкие к активным, их выполняют с превышением конструктивного угла над углом входа ($i > 0$) до 5° .

2. Чтобы обеспечить заданное направление потока на выходе из решетки, необходимо учесть отклонение потока. Обычно при этом подразумевают разность углов β_2 и $\beta_{2зф}$, и таким образом, стоит задача расчета $\beta_{2зф}$. Здесь следует различать режимы работы решетки. Если решетка профилируется при $\lambda_{2ад} < \lambda_{2ад}^{пред}$, где $\lambda_{2ад}^{пред}$ - скорость потока на выходе, при которой в горле наступает кризис, то по [12]:

$$\beta_{2зф} = \arcsin \left[\frac{\sin \beta_2 \cdot \Psi(\lambda_{2ад}^{пред} \cdot \Psi_{np}) \cdot \pi(\lambda_{2ад})}{\cos \frac{\delta - \omega_2}{2} \cdot \Psi(\lambda_{2ад} \cdot \Psi_{np} \cdot \cos(\beta_{2к} + \frac{\delta}{2})) \cdot \pi(\lambda_{2ад} \cdot \frac{\Psi_{np} \cdot \cos \beta_2}{\Psi_{1-n} \cdot \cos(\beta_{2к} + \frac{\delta}{2}))} \right] \quad (I)$$

Здесь γ и π - газодинамические функции приведенной скорости λ ;
 $\Psi_{пр}, \Psi_{1-n}$ - коэффициенты скорости, характеризующие профильные потери и потери на участке от входа в решетку до горла соответственно.

В связи с тем, что некоторые из этих параметров заранее не известны, величина горла решетки уточняется в ходе ее построения. Для первой оценки $\beta_{2эф}$ можно воспользоваться кривыми приложения I, воспроизводящими расчет по формуле (I) при средних статистических значениях некоторых параметров:

$$\Psi_{пр} = 0,98; \quad \Psi_{1-n} = 0,99; \quad \delta = 16^\circ; \quad \frac{\delta - \omega_2}{2} = 4,5^\circ; \quad \beta_{2к} = \beta_2$$

(Оценка $\Psi_{пр}, \Psi_{1-n}$, назначение δ и т.д. приводят к уточнению $\beta_{2эф}$. Окончательная коррекция горла может осуществляться после построения профиля изменением угла его установки χ).

В случае $\lambda_{2ад} \geq \lambda_{2ад}^{пред}$ эффективный угол выхода подсчитывается так:

$$\beta_{2эф} = \arcsin \left[\frac{\sin \beta_2}{\cos \frac{\delta - \omega_2}{2}} \cdot \frac{\gamma(\Psi_{пр} \cdot \lambda_{2ад}) \cdot \pi(\lambda_{2ад})}{\gamma(\Psi_{1-n}) \cdot \pi(1)} \right] \quad (2)$$

Имея в виду малые значения δ для таких скоростей и необходимость соблюдать неравенство*)

$$\delta \geq \omega_2, \quad (3)$$

можно получить первое приближение $\beta_{2эф}$, если принять $\delta - \omega_2 = 0$ и оценить Ψ_{1-n} . После построения решетки величина горла уточняется.

Величина $\lambda_{2ад}^{пред}$ определяется зависимостью

$$\lambda_{2ад}^{пред} = \frac{\Psi_{1-n} \cdot \cos(\beta_{2к} + \frac{\delta}{2})}{\Psi_{пр} \cdot \cos \beta_2} \quad (4)$$

Если не представляется возможным заранее определить $\beta_{2к}$ и δ и разделить потери, то оценку $\lambda_{2ад}^{пред}$ можно выполнить по следующему уравнению, основанному на уже упомянутых статистических данных:

$$\lambda_{2ад}^{пред} = 1,01 \frac{\cos(\beta_2 + 8^\circ)}{\cos \beta_2} \quad (5)$$

3. Входная и выходная кромки выполняются в виде дуг окружностей. Выходная кромка должна быть как можно тоньше, так как с уменьшением τ_2 снижаются закромочные потери. Все же, исходя из прочности

*) Подробнее об этом см. на стр. 27.

пера в работе и при его изготовлении для лопаток, хорды которых исчисляются десятками миллиметров, толщина выходной кромки обычно порядка одного миллиметра.

По статистике сопловых и рабочих лопаток [13] различных доведенных по прочности турбин ГТД следует, что $d_2 = (0,09+0,56)d_m$ и $d_2 = (0,01+0,05)b$, причем у рабочих лопаток относительная толщина выходных кромок периферийных сечений больше таковой для втулочных.

4. Входная кромка выполняется толще выходной. При выборе τ_1 следует учитывать, что профиль с малым τ_1 может иметь малые потери, если поток набегает на него под оптимальным углом атаки. Если же угол потока точно не известен или он переменный, то выбирают большие значения τ_1 . Такой профиль оказывается малочувствительным к углам атаки, но имеет меньшие значения коэффициентов скорости Ψ_{np} при оптимальном угле натекания. Слишком большое увеличение τ_1 может привести к тому, что канал между лопатками станет неконфузорным.

По статистике $d_1 = (0,23+0,77)d_m$ и $d_1 = (0,016+0,162)b$, и обработка ее дает следующие зависимости:

$$\frac{\tau_1}{b} = 1,89 \frac{\tau_2}{b} - 0,00204 K_K + 0,0138 \quad (6)$$

или

$$\frac{\tau_1}{b} = 0,1469 \frac{\tau_2}{b} + 0,00205 K_K + 0,1866 \bar{d}_m - 0,0004 \quad (7)$$

В этих формулах

$$K_K = \frac{\sin \beta_{1K}}{\sin \beta_{2K}}; \quad \bar{d}_m = \frac{d_m}{b}$$

5. Относительное положение максимальной толщины профилей находится в пределах $0,2+0,45$. В литературе не встречаются указания о том, от чего зависит \bar{X}_{d_m} . Известно лишь, что для получения канала постоянной ширины, т.е. для построения активной решетки, необходимо соблюдать $\bar{X}_{d_m} \approx 0,5$. При проектировании конфузорных решеток хорошие каналы получаются и при $\bar{X}_{d_m} < 0,5$ так, что, чем больше конфузорность решетки K , тем может быть меньшим значение \bar{X}_{d_m} .

Часто при проектировании рабочих лопаток положение максимальной толщины диктуется вопросами прочностными, а именно, требуемым местом расположения центра тяжести профиля.

В приложении 2 дается график для оценки значения \bar{X}_{d_m} , со-

ставленный на основе обработки статистических данных. За расчетное \bar{X}_p принято значение относительного положения максимальной толщины в предположении, что скелетная линия профиля представляет из себя дугу окружности и что максимальная толщина его располагается там, где поток, обтекающий профиль, движется нормально фронту решетки. Тогда

$$\bar{X}_p = \frac{\sin \frac{90^\circ - \beta_{1к}}{2} \cdot \cos \frac{90^\circ - \beta_{1к}}{2}}{\sin \frac{\alpha_k}{2}}$$

а эмпирическая зависимость \bar{X}_{dm} от \bar{X}_p выражается формулой:

$$\bar{X}_{dm} = 0,283 - 0,362 \bar{X}_p + 0,894 \bar{X}_p^2$$

Из выражения для X_p видно, что если угол входа β_1 близок к 90° , то $\bar{X}_p \approx 0$, т.е. максимальная толщина приближается вплотную к входной кромке, что, однако, в практике профилирования не встречается. При $\beta_1 \geq 90^\circ$ $\bar{X}_{dm} = 0,22 \pm 0,29$.

6. Максимальная толщина профиля d_m обычно определяется площадью профиля, потребной из условия прочности. При больших Θ и малых K увеличение d_m позволяет устранить местную диффузность межпрофильного канала и тем самым ведет к улучшению аэродинамических характеристик решетки.

По статистике величина d_m изменяется в больших пределах и составляет $d_m = (0,028 \pm 0,35) \beta$, причем для соплых лопаток этот интервал более узок и равен $d_m = (0,1 \pm 0,2) \beta$.

Абсолютное значение максимальной толщины можно подсчитать, используя следующую зависимость для определения площади:

$$f = 1,066 \left[z_m + \bar{X}_{dm} z_1 + (1 - \bar{X}_{dm}) z_2 \right] L_p, \quad (8)$$

где

$$L_p = \frac{\beta - (z_1 + z_2)}{2 \sin \frac{\alpha_k}{2}} \Theta + z_1 + z_2 \quad (9)$$

представляет собой длину развертки профиля в предположении замены скелетной линии дугой окружности. (Для облегчения подсчета L_p дан график в приложении 3)

Из (8) следует:

$$d_m = 2 \left[\frac{f}{1,066L_p} - \bar{X}_{d_m} z_1 - (1 - \bar{X}_{d_m}) z_2 \right]. \quad (10)$$

Для прикидочных оценок при заданных значениях f и \bar{b} , толщина профиля может быть рассчитана по статистической зависимости из [13]:

$$d_m = \frac{f}{0,776}. \quad (10')$$

7. При заданной ширине решетки S хорда профиля \bar{b} определяется углом установки γ . Ориентировочно

$$\bar{b} = \frac{S}{\sin \gamma}. \quad (11)$$

Угол γ зависит от конструктивных углов входа и выхода и относительной максимальной толщины профиля \bar{d}_m : чем больше $\Delta\beta_k = \beta_k - \beta_{2k}$ и больше K_k и чем меньше \bar{d}_m , тем меньше γ . Обработка статистических данных дала следующую зависимость угла γ :

$$\gamma = 76,05 - 0,7029 \Delta\beta_k + 0,00278 (\Delta\beta_k)^2.$$

Этой зависимостью можно пользоваться в процессе проектирования, если не известна величина \bar{d}_m . Если же она известна, то лучше воспользоваться более точным выражением:

$$\gamma = 52,01 - 0,2459 \Delta\beta_k + \frac{\sqrt{\bar{d}_m}}{R_k} (41,59 + 1,932 \Delta\beta).$$

Эти зависимости представлены в виде графиков в приложении 4.

8. Абсолютное значение хорды влияет на газодинамические параметры решетки через число Рейнольдса, в котором в качестве линейного параметра принята хорда: $Re = \frac{\omega_{гр} \cdot \bar{d}_m}{\nu}$.

При $Re < 1,5 \div 2,0 \cdot 10^5$ уменьшение числа Рейнольдса приводит к уменьшению коэффициента скорости в решетке $\psi_{гр}$.

9. Существенным параметром решетки является относительный шаг \bar{t} . Оптимальное значение его колеблется в значительных пределах (для наиболее употребительных решеток этот предел составляет $0,6 \div 0,9$). Чем больше β_1 при постоянном β_2 , или чем больше β_2 при постоянном β_1 , тем больше \bar{t}_{opt} . График, заимствованный из [8], дан в приложении 5.

10. Контуры корыта и спинки должны очерчиваться линиями с мо-

потоком изменением кривизны: от большей на входе к малой на выходе [5,7,14]. В частности, они могут очерчиваться линиями постоянной кривизны - дугами окружностей.

Сопряжение отдельных участков контуров не должно сопровождаться скачками кривизны, особенно на спинке.

II. Кривизна спинки на участке косога среза определяется углом отгиба выходной кромки δ . При дозвуковых скоростях потока на выходе из решетки рекомендуется выполнять $\delta \geq 10^\circ$. (Практически встречаются решетки, у которых δ достигает 30° .) Если же $\lambda_{2\alpha\delta} = 1,0+1,3$, то $\delta = (7+4)^\circ$.

12. Толщина профиля должна изменяться плавно, утолщаясь от входной кромки до максимальной толщины, а затем утоняясь в направлении выходной кромки. Поэтому контуры спинки и корыта в точках сопряжения с окружностями, образующими кромки, не параллельны между собой и образуют углы заострения ω_1 и ω_2 .

Чем больше максимальная толщина d_m отличается от толщин кромок d_1 и d_2 , тем больше соответствующие углы заострения. Их величины могут быть оценены по следующим формулам:

$$\omega_1 = 3,79 \operatorname{arctg} \frac{z_m - z_1}{\bar{X}_{d_m} \cdot L_p} \quad (12)$$

$$\omega_2 = 1,995 \operatorname{arctg} \frac{z_m - z_2}{(1 - \bar{X}_{d_m}) L_p} \quad (13)$$

где L_p определяется по (9), $z_m = \frac{d_m}{2}$.

13. Считается желательным, чтобы угол $\beta_{2к}$ был примерно равен углу $\beta_{2эф}$ [15]. Этого, однако, не всегда удается достигнуть, особенно у относительно толстых сечений ($\bar{d}_m = 0,2+0,45$). Влияние угла $\beta_{2к}$ на угол $\beta_{2эф}$ может быть расчетно определено по (I).

14. Канал, образуемый двумя соседними профилями решетки, должен быть плавно сужающимся от входа к выходу. Наличие местных расширений, местной диффузности - нежелательно [5,7].

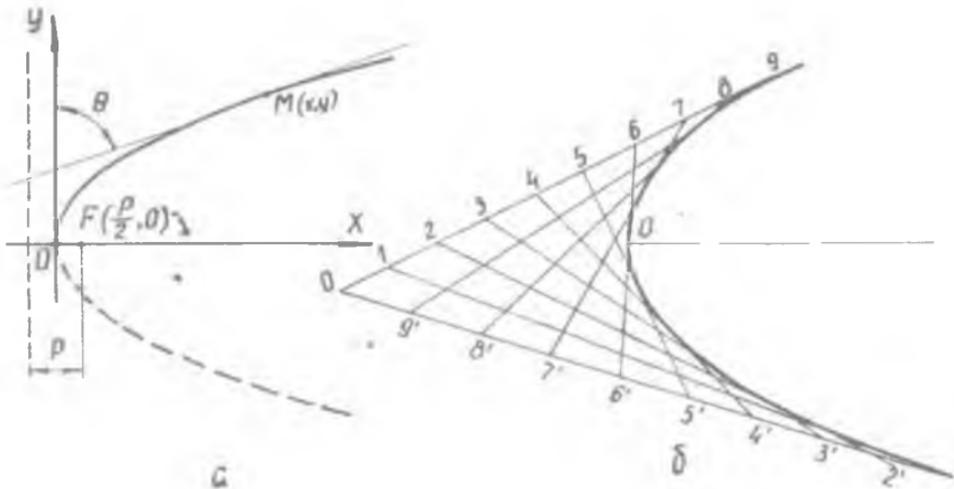
В ходе построения конкретного профиля лопатки нередко приходится отступать от оцененных значений углов $\beta_{1к}$, $\beta_{2к}$, ω_1 , ω_2 , γ_i а также от значений величин \bar{X}_{d_m} , d_m и z_1 (см. §§5,6,13). Существование, чтобы профиль имел заданные значения характеристик (например, площадь, положение центра тяжести) и чтобы были выполнены требования к межпрофильному каналу.

§ 3. Кривые для образования контуров профиля.
Инструмент для графических построений

Исходя из требований, отмеченных в § 2, кривые, используемые для образования контуров корыта и спинки, должны отличаться, прежде всего, монотонным изменением кривизны. Желательно также, (для случаев, когда требуется сопряжение с прямой линией), чтобы в какой-либо из конечных точек кривой радиус кривизны равнялся бесконечности.

На практике для построения профилей используются квадратные параболы, лемнискаты Бернулли, гиперболические спирали, дуги окружностей и отрезки прямых.

Кривизна параболы $y^2 = 2px$ (рис.4а) изменяется не монотонно. Минимальный радиус кривизны парабола имеет в своей вершине. Он равен параметру параболы p . Чем дальше от вершины, тем больше радиус кривизны кривой. Но ни в одной из конечных точек радиус кривизны не достигает бесконечно большого значения, $R_{кр} \rightarrow \infty$ лишь при $x \rightarrow \infty$. Поэтому параболу нельзя сопрягать с прямой без скачка кривизны в точке сопряжения.



Требование о монотонности изменения кривизны предопределяет возможность использовать при профилировании лишь одну ветвь параболы, при этом нельзя получить контур с углом кривизны, равным $\frac{\pi}{2}$ и более. Действительно, касательная в точке с минимальным радиусом кривизны, в точке $x = 0$, есть ось ординат, а касательная в точке с максимальным радиусом кривизны, т.е. при $x \rightarrow \infty$, параллельна оси абсцисс. Таким образом $\theta_{\max} < \frac{\pi}{2}$.

Для построения профилей может быть изготовлен комплект лекал-парабол, отличающихся параметром ρ . Если лекала отсутствуют, то парабола строится показанным на рис.4б графическим способом, применение которого для построения контуров профиля предложено Г.Ю.Степановым [4].

Одна четверть лемнискаты $\rho = a\sqrt{2\cos 2\varphi}$ (или в декартовых координатах $y = \sqrt{a\sqrt{a^2 + 4x^2} - (a^2 - x^2)}$) представляет собой кривую (рис.5,а) с монотонным изменением радиуса кривизны от минимального значения $R_{\text{кр}} = \frac{2}{3}a$ в вершине лемнискаты до $R_{\text{кр}} = \infty$ в начале координат. При профилировании используется лишь одна четверть лемнискаты, при этом можно получить контур с максимальным углом кривизны, равным $\frac{3}{4}\pi$.

Достижение бесконечно большого радиуса кривизны в реальной точке делает лемнискату удобной для построения профилей, так как она может быть сопряжена с прямой линией без скачка кривизны.

Для построения лемнискаты можно использовать следующий графический способ, изложенный в [16]. Откладываем на оси абсцисс от точки O отрезок $OA = a$ (рис.5б), на оси ординат откладываем отрезок $OB = a$; радиусом, равным $AB = a\sqrt{2}$, описываем окружность с центром в начале координат; под произвольным углом φ (но меньшим $\frac{\pi}{4}$) проводим прямую N_1ON ; из точки N опускаем на ось абсцисс перпендикуляр ND , из точки A радиусом, равным OD , засекаем на OB точку C . Катет OC и будет определять длину радиуса-вектора точки лемнискаты, соответствующей углу φ . Теперь остается радиусом, равным OC , сделать засечку на прямой N_1ON в точке M , которая будет принадлежать лемнискате. Повернув прямую N_1ON на некоторый угол и повторив указанное построение, получим вторую точку кривой и т.д.

Особенность гиперболической спирали $\rho = \frac{a}{\varphi}$ (рис.6) состоит в том, что прямая $y = a$ является для нее асимптотой, а начало ко-

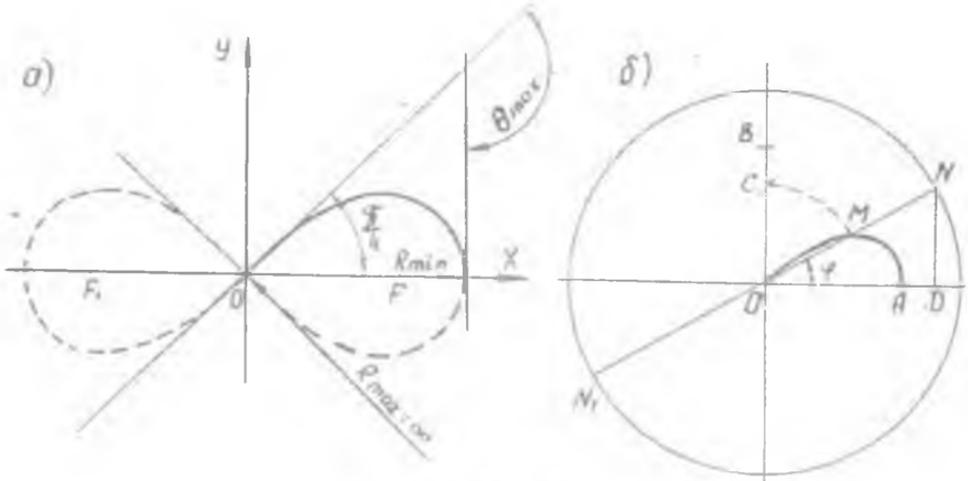
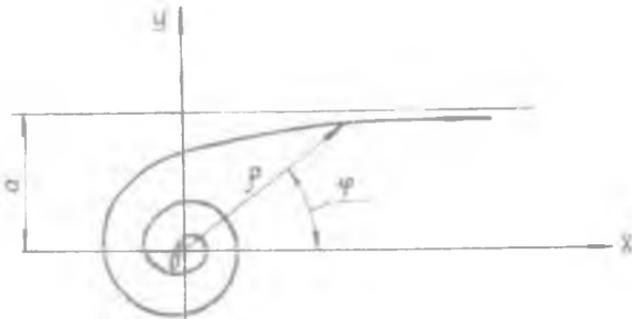


Рис. 5.

ординат - асимптотической точкой. Радиус кривизны гиперболической спирали изменяется монотонно от $R_{np} = \infty$ при $\varphi = 0$ до нуля при $\varphi = \infty$. Так как кривая огибает полюс, то она может быть использована для получения контуров с большими углами кривизны, вплоть до предельного значения $\Theta = \pi$.

Лекала, выполненные по гиперболическим спиральям, удобно пользоваться при построении решеток с любыми углами поворота потока, в том числе и большими.

Если в распоряжении проектанта имеются лекала, о которых достоверно не известно, по каким кривым они выполнены, то ими можно



пользоваться, лишь убедившись в монотонности изменения кривизны очерка. Делается это следующим образом. Прочертив контур исследуемого лекала (рис.7), разбивают его на несколько участков, сопряженных хордами одинаковой длины b . Замеряют прогибы h . Кривая имеет монотонное изменение радиуса кривизны, если прогибы изменяются монотонно, т.е. если $h_{i-1} \geq h_i \geq h_{i+1}$. Может оказаться, что кривизна лекала по всему контуру изменяется не монотонно, как это имеет место у ходовых лекал, находящихся в продаже. Тогда приходится пользоваться отдельными участками лекала, на которых соблюдается требование о кривизне.

Контур корыта и спинки нередко представляют собой совокупность двух или более участков различных кривых. Используются такие сочетания: дуга окружности и парабола; дуга окружности, лемниската и прямая; дуга окружности, лемниската и прямая; дуга окружности и гиперболическая спираль [9] и т.д.

Как будет показано ниже, очень удобным является использование дуг окружностей для очерчивания входных участков профилей.

Сопряжение окружностей с кривой переменной кривизны позволяет, сохранив предъявляемые к кривизне требования, увеличить возможность кривой в отношении угла кривизны контура. На рис.8 показано, что, дополнив ветвь параболы дугой окружности, сопряженной с параболой в ее вершине, можно значительно увеличить угол кривизны контура θ , доведя его до предельного для решетки.

При построении профилей используют и отрезки прямых линий. Это вызывается различными конструктивными требованиями, а также может быть вызвано необходимостью выполнить выходной участок спинки с малым углом отгиба δ при сверхзвуковых скоростях потока.

Прибегая к сопряжению отдельных участков корыта и спинки, не-

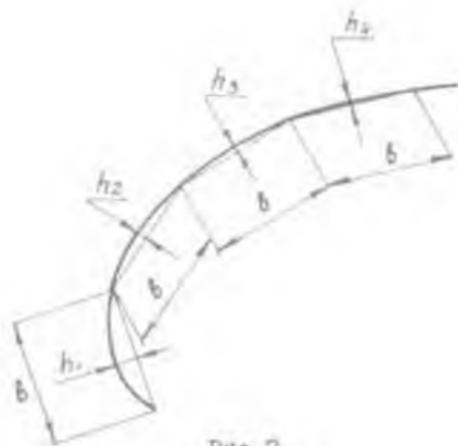


Рис.7.

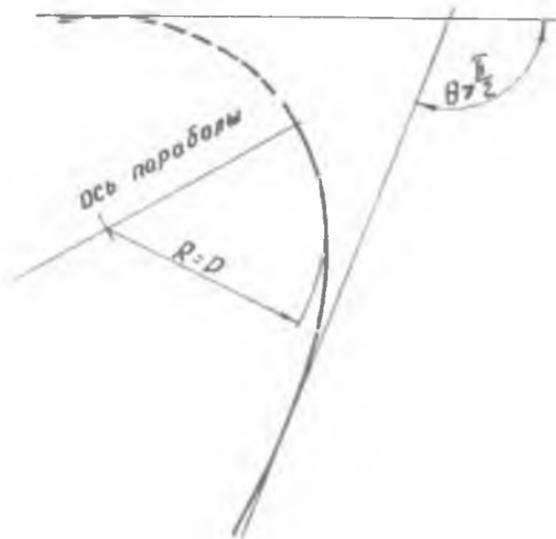


Рис. 8.

обходимо иметь в виду, что геометрически верным считается сопряжение, если в точке, общей для двух линий, касательные к обеим линиям совпадают. Однако при этом, в общем случае, радиусы кривизны у сопрягаемых кривых в точке сопряжения отличны друг от друга. Так как одним из требований к форме контуров является отсутствие скачков кривизны, то сопряжение должно выполняться с учетом этого требования.

На рис.9 показаны примеры сопряжений различных кривых друг с другом: при-

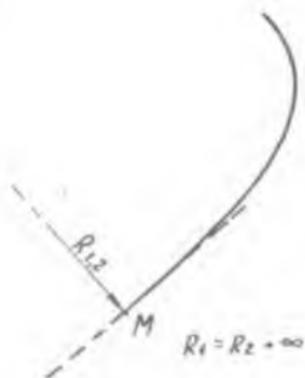
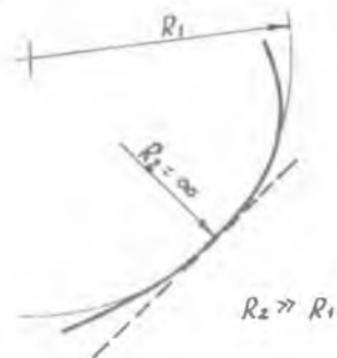
емы нежелательные, приводящие к скачкам кривизны в точке сопряжения, но часто используемые начинающими профилировщиками, а также приемы, при которых сопряжение линий осуществляется без скачков кривизны, — именно так и необходимо сопрягать отдельные участки контуров.

Из сказанного следует, что если построение профилей выполняется на конструкторских чертежных досках, то дополнительным инструментом, которым должен располагать проектант, является лекала и циркули. Так как циркули обычных готовален имеют небольшой раствор, то для профилирования необходимо иметь еще циркули с раствором до 500–1000 мм.

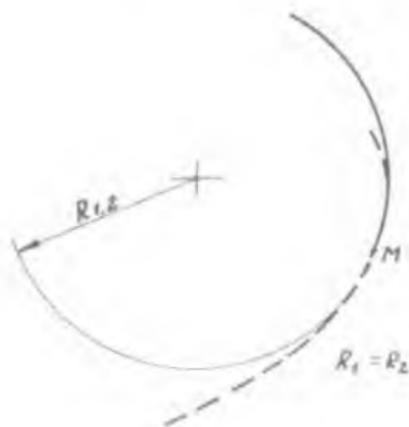
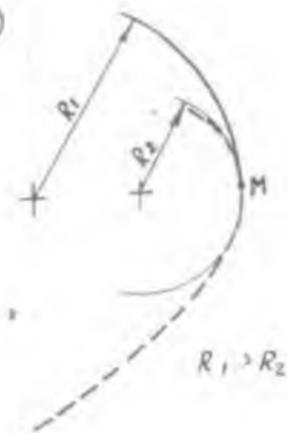
§ 4. Метод построения конвусной решетки профилей

Для построения решетки будем считать заданными: треугольник скоростей; приведенную адиабатическую скорость на выходе из решетки $\lambda_{2ад}$ или перепад давлений $\frac{P_1}{P_2}$, ширину решетки S или ее шаг t . Из предварительных прочностных расчетов, или по иным

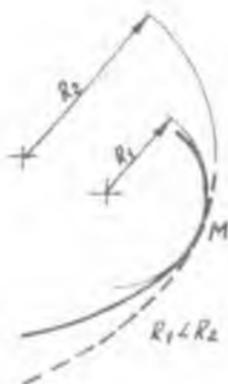
a)



b)



b)



конструктивным соображениям, может быть задана площадь профиля f или максимальная толщина d_m , а также толщина выходной кромки d_2 .

В ходе подготовки к профилированию определяют эффективный угол выхода, оценивают конструктивные углы входа и выхода, хорду профиля и другие элементы, необходимые для построения решетки.

При $\lambda_{2ад} < \lambda_{2ад}^{пред}$ определение $\beta_{2эф}$ проводится по графику, приведенному в приложении I.

Если $\lambda_{2ад} \geq \lambda_{2ад}^{пред}$, то $\beta_{2эф}$ определяется по формуле (2).

В соответствии с рекомендациями § 2 принимаем $\beta_{1к} = \beta_1 - 2^\circ$ (заранее не следует идти на выбор $\beta_{1к} > \beta_1$) и $\beta_{2к} = \beta_{2эф}$.

Приступая к оценке величины хорды, определяем примерное значение угла установки γ по кривой I в приложении 4 и, далее, подсчитываем величину хорды δ по формуле (II). Шаг решетки находится по величине хорды и значению оптимальной величины относительного шага, определяемому по графику в приложении 5

$$t = \delta \left(\frac{1}{\beta} \right)_{opt} \quad (I4)$$

Далее можно оценить радиус входной кромки по формуле (6), положение максимальной толщины по данным приложения 2 и величину d_m , если она не задана, по формуле (IO). Для облегчения расчетов по этой формуле значение L_p находится с помощью графика в приложении 3.

После оценки величины d_m целесообразно уточнить значение угла γ по кривым семейства 2 в приложении 4.

Теперь остается подсчитать значения углов заострения ω_1 по формуле (I2) и ω_2 по формуле (I3), и можно приступить к построению профиля и решетки.

Построение производится на ватмане, кальке или миллиметровой бумаге в крупном масштабе. Для лопаток турбин обычных для ГТД габаритов масштаб выбирают 10:1, для лопаток турбин ТНА и других малогабаритных турбин 20:1. При выборе масштаба изображения и формата листа необходимо учитывать, что на листе изображаются два профиля: один полностью, другой, соседний на расстоянии шага со стороны спинки первого, должен быть представлен хотя бы одним корытом. Таким образом высота листа должна быть больше ширины решетки ($H > S$), а оценка ширины листа может быть выполнена на основании следующего неравенства:

$$B > (t + s \operatorname{ctg} \gamma)$$

Один из возможных методов построения профиля состоит в следующем. Отложим на прямой линии, принятой за фронт решетки, шаг t (рис.10) и прочертим окружности выходных кромок двух соседних профилей радиусом r_2 .

Из точки O_t - центра окружности выходной кромки того профиля, который будет изображаться неполностью, проведем дугу радиуса $(r_2 + r_2)$. Чтобы обеспечить эффективный угол $\beta_{2эф}$, достаточно контур спинки провести так, чтобы он коснулся этой дуги.

Приняв $\beta_{2к} = \beta_{2эф}$ и назначив выходной угол заострения ω_2 в соответствии с выполненной оценкой, проведем касательно к окружности с центром O прямую под углом $(\beta_{2сн} = \beta_{2к} - \frac{\omega_2}{2})$. С помощью лекала*) переменной кривизны проведем участок спинки mn , начиная от выходной кромки (рис.10а). При этом в зависимости от кривизны лекальной кривой получается различный угол отгиба δ , который должен быть выбран в зависимости от $\lambda_{2ад}$ в пределах рекомендованных значений (см.стр.19).

Если полученное значение δ больше рекомендованного, то вновь проводят выходной участок спинки, но иным лекалом***) с меньшей кривизной контура. При этом касание окружности r_2 может произойти под углом, большим, чем $\beta_{2к} - \frac{\omega_2}{2}$. Но это и не столь важно, так как значение ω_2 выбрано ориентировочно и, кроме того, может быть, в крайнем случае, допущено некоторое неравенство углов $\beta_{2к}$ и $\beta_{2эф}$.

При выборе значений углов ω_2 и δ надо также иметь в виду, что для получения конфузурного межлопаточного канала должно соблюдаться неравенство

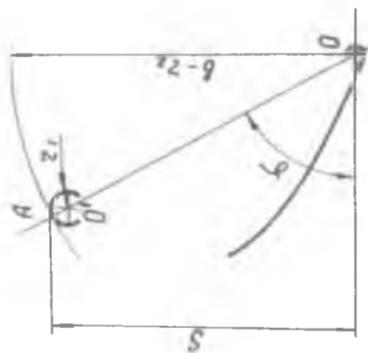
$$\omega_2 \leq \delta \quad (15)$$

Нарушение его приводит к появлению местной диффузорности на подходе к "горлу", узкое сечение канала перемещается от обычного положения вверх по потоку и становится меньшим, чем $t \sin \beta_{2эф}$. Поэтому указанное неравенство должно соблюдаться строго.

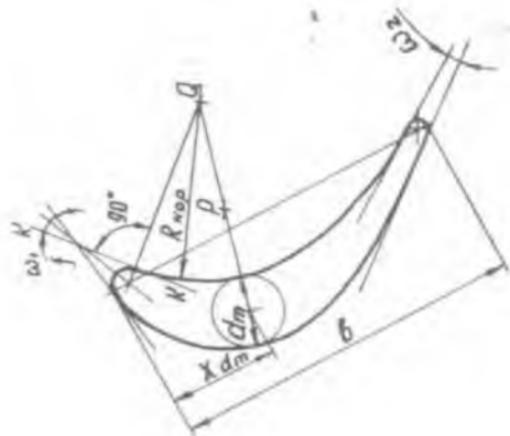
Чтобы продолжить контур спинки до входной кромки, надо знать ее положение. Положение входной кромки можно определить по величине и направлению хорды. Зная, что величина хорды уже определе-

*) Как указано в § 3, лекала могут быть очерчены параболами, лемнискатами Бернулли, гиперболлическими спиралями и другими кривыми.

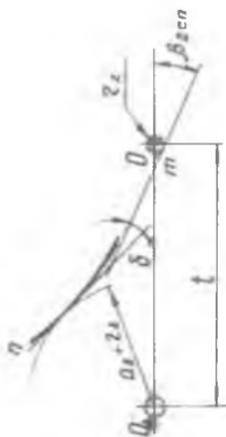
**) Оно может быть выполнено по той же кривой, но при ином значении ее параметра.



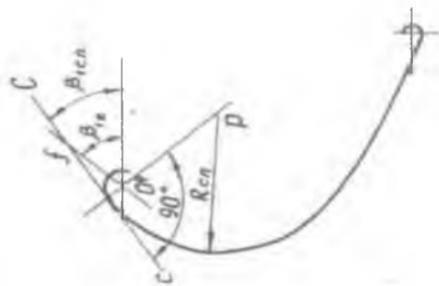
1)



2)



3)



4)

Рис.10.

на, из центра окружности выходной кромки (из точки O) проводят дугу радиусом $\bar{b} - z_2$ (рис.10б). Хорда профиля будет равна принятому значению \bar{b} , если входная кромка коснется проведенной дуги в любом ее месте.

Направление хорды определяется углом γ . Из точки O проведем луч OA под углом γ к фронту. Пересечение его с дугой радиусом $\bar{b} - z_2$ определяет положение входной кромки.

Используя выбранное значение z_1 , прочерчивают окружность входной кромки.

Входную кромку удобно сопрягать с контурами корыта и спинки дугами окружностей, которые представляют из себя входные участки соответствующих контуров.

Из центра окружности входной кромки (точка O') проводят луч под углом $\beta_{1к}$ к фронту решетки (рис.10в). Имея в виду, что значение угла заострения ω_1 уже оценено, проведем под углом $\beta_{1сн} = \beta_{1к} - \frac{\omega_1}{2}$ касательную к окружности входной кромки $C-C$ со стороны спинки до пересечения ее с лучом из точки O' в точке f . На перпендикуляре к линии $C-C$, проходящем через точку O' , выбирают центр дуги $R_{сн}$ (точку P), которая образует входной участок спинки, сопрягаемый с выходным участком mn . Если плавное сопряжение не получается, то можно варьировать углами γ, ω_1 , прибегать к использованию дополнительных кривых, связывая дугу с выходным участком и, наконец, изменять сам участок mn , сохраняя при этом угол δ в диапазоне рекомендованных значений.

Построение контура корыта удобно начинать с проведения через точку f касательной $k-k$ к окружности входной кромки (рис.10г). Между прямыми $c-c$ и $k-k$ образуется таким образом угол ω_1 . На перпендикуляре к линии $k-k$, проходящем через точку O , выберем центр дуги $R_{кор}$, которая образует входной участок корыта. Первый вариант дуги $R_{кор}$ может быть выбран следующим образом. На расстоянии $X_{d_m} = \bar{X}_{d_m} \cdot \beta$ от входной кромки прочерчивается окружность диаметром d_m касательно к контуру спинки. Центр этой окружности соединяется с точкой P прямой линией, продолжаемой до пересечения с перпендикуляром к линии $k-k$ в точке Q . Эта точка и принимается за центр дуги $R_{кор}$.

Участок корыта, образованный дугой $R_{кор}$, продолжим до выходной кромки лекальной кривой с монотонным изменением радиуса кривой.

визны. Сопряжение корыта с выходной кромкой определяется уже выбранным значением выходного угла заострения ω_2 . Если не удается (используя различные лекала), хорошо выполнить сопряжение корыта с выходной кромкой или не плавно изменяется толщина профиля, то следует перестроить корыто. При этом можно варьировать величиной $R_{кор}$, положением максимальной толщины X_{d_m} или значением максимальной толщины d_m , если к ней не предъявляются строгие требования. В крайнем случае приходится прибегать и к изменению входного угла заострения ω_1 , а, следовательно, и к коррекции спинки.

§ 5. Контроль межпрофильного канала

Как отмечалось в § I, газодинамическое совершенство решетки построенных профилей определяется эпюрой скорости потока вдоль контуров спинки и корыта. Эпюры, которые приводят к малым профильным потерям, обычно отличаются монотонным увеличением скорости от входной кромки к выходной; небольшое местное снижение скорости, если оно не приводит к отрыву потока, не вызывает существенного увеличения потерь.

Так как расчетное определение скорости на контуре профиля является весьма трудоемкой задачей, то на практике часто пользуются контролем формы канала, позволяющим достаточно надежно судить о качестве конфузорной решетки.

С целью проведения такого контроля построим корыто соседнего профиля (рис. II) и к нему эквидистанту на расстоянии величины "горла" α_2 . Таким образом в канале выделяется полоса постоянной ширины. По виду оставшейся области судят о том, хорош ли канал.

Если оставшаяся область представляет из себя плавно сужающуюся зону (рис. II, а), то это значит, что канал конфузорный и что, в этом смысле профиль выполнен правильно. Если же ширина оставшейся зоны изменяется не монотонно (рис. II б), то это свидетельствует о наличии местных диффузоров в канале, от которых надо попытаться избавиться. На рис. II в изображен канал, получаемый при несоблюдении неравенства (15).

Количественно местная диффузорность может быть определена как отношение диаметра максимальной окружности d_m , вписанной между контуром спинки одного профиля и контуром корыта соседнего, к ди-

Случай, когда $\delta < \omega_2$

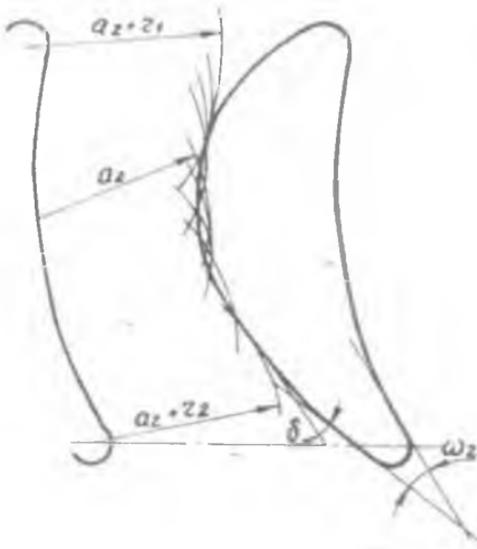


Рис. II б

аметру окружности a_1 , вписанной таким же образом на входе в каналах:

$$\bar{D} = \frac{a_m}{a_1} \quad (16)$$

Если профили решетки построены изложенным в инструкции методом и бельевые участки контуров корыта и спинки выполнены дугами окружностей, то для определения a_m и a_1 нет необходимости вписывать окружности между соседними профилями. Соответствующие значения определяются построениями,

показанными на рис. II б. Из точки P - центра дуги $R_{сп}$ исходного профиля через центр дуги $R_{кор}$ соседнего профиля (точку Q_t) проводится прямая до пересечения с контуром корыта этого профиля (точка P''). Отрезок прямой от точки P'' до пересечения со спинкой исходного профиля ($P'P''$) равен a_m . Для определения a_1 соединяют прямой линией точку P с центром окружности входной кромки соседнего профиля, - точкой O'_t . Прямая пересекает соседний профиль уже не по корыту, а по входной кромке (в точке N''). Отрезок прямой $N''N'$ представляет из себя a_1 .

Пока нет обобщенных данных по количественному влиянию местной диффузорности на потери в решетке, будем для определенности считать допустимым значением $\bar{D} = 1,10$ т.е. 10-процентную диффузорность.

Уменьшение и полное устранение местных диффузоров может быть достигнуто: увеличением площади сечения; уменьшением толщины

входной кромки; увеличением угла входа $\beta_{1к}$.

Увеличение площади за счет максимальной толщины d_m приводит к увеличению углов заострения. Благодаря этому корыто профиля приближается к спинке соседнего профиля, причем наиболее существенно в зоне максимальной толщины, и канал в этом месте сужается. Чтобы при таком изменении сохранить участок спинки $m\pi$, следует изменить положение входной кромки, увеличив угол установки γ .

Уменьшение толщины входной кромки снижает местную диффузорность потому, что при этом увеличивается диаметр окружности d_1 .

Как следствие увеличения конфузорности решетки, увеличение угла $\beta_{1к}$ ведет к снижению местной диффузорности. Увеличение $\beta_{1к}$ удобно выполнять, уменьшая угол установки γ .

Несмотря на наличие принципиальных возможностей устранить местную диффузорность, практически в ряде случаев приходится ее оставлять, так как чрезмерное увеличение площади ведет к затяжелению профиля, увеличение $\beta_{1к}$ - к гидравлическим потерям, уменьшение γ - к появлению трещин и к гидравлическим потерям из-за повышенной чувствительности к ударам.

§ 6. Определение геометрических характеристик профилей для расчета лопатки на прочность

Для расчетов лопатки на прочность необходимо уметь определять площадь, положение центра тяжести и моменты инерции профиля. В литературе (например, в [14, 17]) описаны применяемые для этой цели способы, основанные на использовании неравномерной сетки. Более удобным и точным является способ, основанный на использовании равномерной сетки. Построение ее дано в приложении 6.

Основанием сетки являются взаимноперпендикулярные оси Ox_1, Oy_1 и Ox_2, Oy_2 . Угол между осями Ox_1 и Ox_2 $\alpha_1 = -\frac{\pi}{4}$. Параллельно оси Ox_1 проведен ряд прямых - сплошных и штриховых. Расстояния между соседними сплошными линиями равны 1 см. Штриховые линии делят пополам расстояние между соседними сплошными линиями.

Параллельно оси Oy_1 и Oy_2 проведен также ряд прямых - сплошных и штриховых, только расстояния между соседними сплошными линиями равны 2 см. Штриховые линии, как и для оси Ox_1 , делят пополам расстояние между соседними сплошными линиями.

Последующее описание ее дается с учетом материалов, предоставленных Л.Н.Козловым.

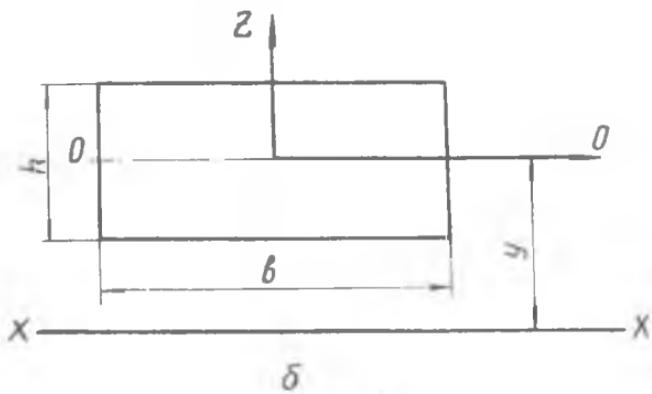
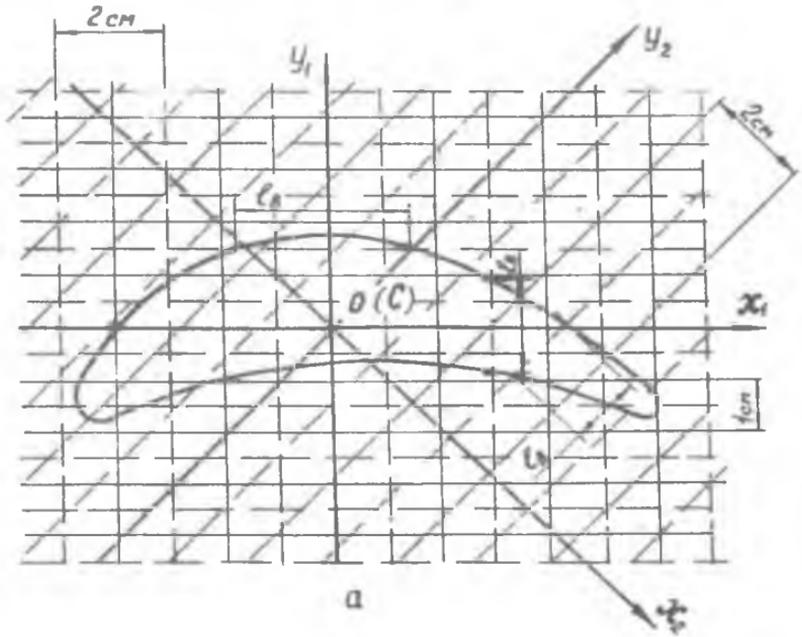


Рис. 12.

Пользуются сеткой так. Исследуемый профиль вычерчивается на кальке в масштабе 10:1. На нем визуальнo выбирается положение центра тяжести - точка С (рис.12,а) и через нее проводятся ориентировочно главные оси инерции - Sx_1 и Sy_1 (рекомендуется ось Sx_1 проводить параллельно прямой, проходящей через центры окружностей скругления кромок профиля). Профиль накладывается на координатную сетку так, чтобы ее центр - точка О - совпал с точкой С профиля, а оси Ox_1 и Oy_1 , совпали соответственно с осями профиля Sx_1 и Sy_1 . В таком положении на профиль наносятся расчетные оси Ox_2 и Oy_2 координатной сетки.

Линиями координатной сетки, параллельными осям Ox_1 , Oy_1 и Oy_2 , профиль разбивается на отдельные прямоугольники. Длина каждого из них определяется длиной l [см] соответствующего участка, заключенного между контурными линиями профиля, и замеряется на середине высоты прямоугольника (рис.12,а). Значения l заносятся в три графы расчетного листа (приложение 7), соответствующие осям ox_1 , oy_1 и oy_2 .

Значения l прямоугольников, расположенных выше и ниже расчетной оси, записываются соответственно в столбы " l_B " и " l_H ". Следует строго определить "верх" и "низ". "Верху" соответствует положительное направление оси, перпендикулярной расчетной.

Далее уже расчетом определяются площадь профиля f , статические моменты M_{ox_1} , M_{oy_1} и M_{oy_2} , действительное положение центра тяжести $(x_{1c_1}, y_{1c_1}, x_{2c_2})$, а также моменты инерции J_{ox_1} , J_{oy_1} и J_{oy_2} .

За площадь f принимается среднеарифметическая величина из значений площадей, определенных замерами длины в трех направлениях:

$$f_1 = \sum (l_B + l_H)_{ox_1}; \quad f_2 = 2 \sum (l_B + l_H)_{oy_1}; \quad f_3 = 2 \sum (l_B + l_H)_{oy_2} \quad (17)$$

Таким образом,

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$$

Определение статических моментов, координат центра тяжести и моментов инерции выполняется по формулам:

$$\begin{array}{l}
 M_{Ox_1} = \sum K_1 (\ell_B - \ell_H)_{Ox_1} \\
 M_{Oy_1} = 4 \sum K_1 (\ell_B - \ell_H)_{Oy_1} \\
 M_{Oy_2} = 4 \sum K_1 (\ell_B - \ell_H)_{Oy_2}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 x_{1c_1} = \frac{M_{Oy_1}}{f} \\
 y_{1c_1} = \frac{M_{Ox_1}}{f} \\
 x_{2c_2} = \frac{M_{Oy_2}}{f}
 \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\begin{array}{l}
 J_{Ox_1} = \sum K_2 (\ell_B + \ell_H)_{Ox_1} \\
 J_{Oy_1} = 8 \sum K_2 (\ell_B + \ell_H)_{Oy_1} \\
 J_{Oy_2} = K_2 (\ell_B + \ell_H)_{Oy_2}
 \end{array}
 \left| \right. \quad (19)$$

В этих формулах K_1 - расстояние от расчетной оси до середины соответствующего прямоугольника; K_2 - момент инерции этого прямоугольника единичной длины относительно расчетной оси.

Для определения K_2 вспомним, что момент инерции прямоугольника относительно оси своей симметрии (рис.12,б)

$$J_{0-0} = \int_f z^2 df = \int_{-h/2}^{h/2} b z^2 dz = b \frac{z^3}{3} \Big|_{-h/2}^{h/2} = \frac{bh^3}{12}$$

Момент инерции этого прямоугольника относительно оси $x-x$

$$J_{x-x} = J_{0-0} + f y^2$$

Для прямоугольника сетки ($b = \ell = 1$), принимая $J_{x-x} = K_2$ и $y = K_1$, имеем

$$K_2 = \frac{1 \cdot 1^3}{12} + 1 \cdot 1 \cdot K_1^2$$

Результаты расчета f , M и J относительно осей Oy_1 и Oy_2 , для которых высоты прямоугольников равны 2 см, умножаются соответственно на 2, 4 и 8.

По найденным значениям координат x_{1c_1} и y_{1c_1} , на профиль наносится действительное положение центра тяжести - точка C_1 (рис.13,а). Координата x_{2c_2} служит для контроля проделанного расчета, причем считается, что расчет выполнен достаточно аккуратно, если несоответствие не превышает 3 мм (в масштабе 10:1).

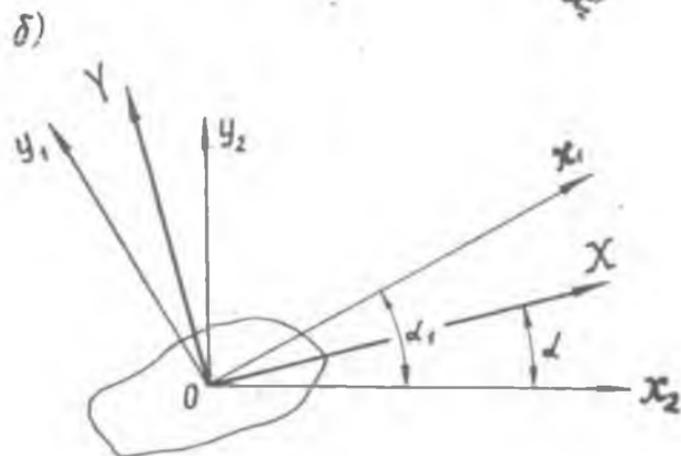
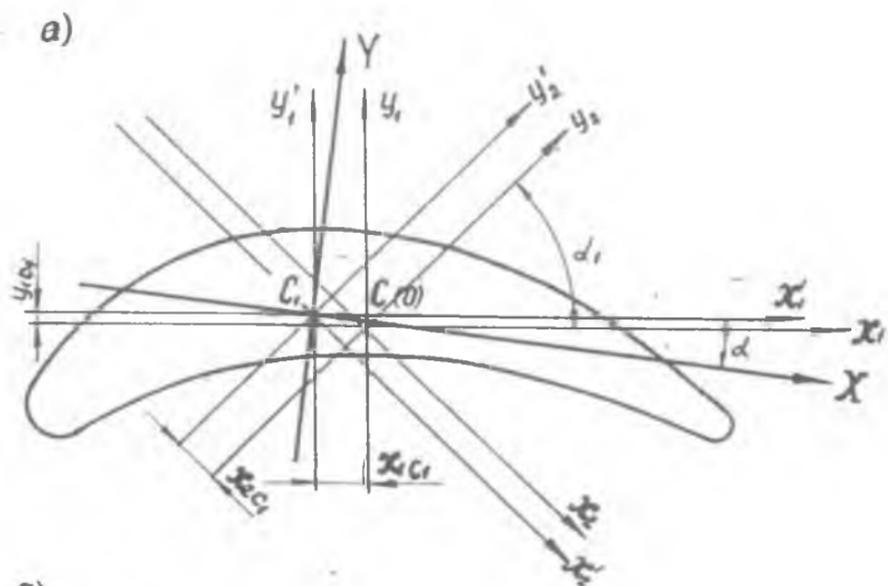


Рис. 13.

Через центр тяжести проводят центральные оси $C_1x'_1$, $C_1y'_1$, $C_1x'_2$, $C_1y'_2$ и далее подсчитываются значения главных моментов инерции профиля J_{\min} и J_{\max} и угол поворота α главных осей относительно оси $C_1x'_1$ ($C_1y'_1$).

Из курса сопротивления материалов (см. например, [19]) известно, что если заданы моменты инерции некоторой плоской фигуры (рис. 13б) относительно двух пар взаимноперпендикулярных осей (J_{x_1} , J_{y_1} и J_{x_2} , J_{y_2}), угол между которыми α_1 , то для определения главных моментов инерции и направления главных осей инерции используются следующие зависимости:

$$J_{\min}^{\max} = \frac{J_{x_1} + J_{y_1}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(J_{x_1} - J_{y_1})^2 + 4J_{x_1y_1}^2} ;$$

$$J_{x_1y_1} = \frac{1}{\sin 2\alpha_1} (J_{x_1} \cdot \cos^2 \alpha_1 + J_{y_1} \cdot \sin^2 \alpha_1 - J_{x_2}) ;$$

$$\frac{1}{\cos 2\alpha} = \pm \sqrt{1 + \frac{(2J_{x_2y_2})^2}{(J_{x_2} - J_{y_2})^2}}$$

В рассматриваемом случае (рис. 13, а)

$$J_{\max} = J_y = \frac{J_{C_1x'_1} + J_{C_1y'_1}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(J_{C_1y'_1} - J_{C_1x'_1})^2 + 4J_{C_1x'_1C_1y'_1}^2} \quad (20')$$

$$4J_{C_1x'_1C_1y'_1}^2 = 4 \left[\frac{1}{\sin 2\alpha_1} (J_{C_1x'_1} \cdot \cos^2 \alpha_1 + J_{C_1y'_1} \cdot \sin^2 \alpha_1 - J_{C_1x'_2}) \right]^2$$

Известно [19], что центробежный момент инерции плоской фигуры относительно осей, повернутых на угол α_1 против исходной системы, может быть выражен формулой:

$$J_{C_1x'_1C_1y'_1} = J_{C_1x'_2C_1y'_2} \cdot \cos 2\alpha_1 + \frac{J_{C_1x'_2} - J_{C_1y'_2}}{2} \cdot \sin 2\alpha_1$$

Тогда при $\alpha_1 = 45^\circ$

$$J_{C_1x'_1; C_1y'_1} = \frac{J_{C_1x'_2} - J_{C_1y'_2}}{2}$$

Таким образом, подставляя полученное выражение в (20), будем иметь

$$\begin{aligned} J_{\max} = J_y &= \frac{J_{C_1x'_1} + J_{C_1y'_1}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(J_{C_1y'_1} - J_{C_1x'_1})^2 + (J_{C_1y'_2} - J_{C_1x'_2})^2} = \\ &= \frac{J_{C_1x'_1} + J_{C_1y'_1}}{2} + \frac{J_{C_1y'_1} - J_{C_1x'_1}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{J_{C_1y'_2} - J_{C_1x'_2}}{J_{C_1y'_1} - J_{C_1x'_1}} \right)^2} \end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned} J_{C_1x'_1} + J_{C_1y'_1} &= A ; \\ J_{C_1y'_1} - J_{C_1x'_1} &= B ; \quad J_{C_1y'_2} - J_{C_1x'_2} = C \end{aligned}$$

Тогда окончательно

$$J_{\max} = J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B} \right)^2} ; \quad (20)$$

$$J_{\min} = J_x = A - J_{\max} = A - J_y \quad (21)$$

Определим угол α :

$$\frac{1}{\cos 2\alpha} = \sqrt{1 + \frac{(2J_{C_1x'_1} C_1y'_1)^2}{(J_{C_1x'_1} - J_{C_1y'_1})^2}} ;$$

$$\cos 2\alpha = \pm \frac{J_{C_1x'_1} - J_{C_1y'_1}}{\sqrt{(J_{C_1x'_1} - J_{C_1y'_1})^2 + (2J_{C_1x'_1} C_1y'_1)^2}} = \pm \frac{J_{C_1x'_1} - J_{C_1y'_1}}{J_{\max} - J_{\min}}$$

Так как

$$J_{C_1y'_1} - J_{C_1x'_1} = B, \quad J_{\max} = J_y, \quad J_{\min} = J_x,$$

то

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_x},$$

причем положительное направление поворота принимается здесь от оси $C_1x'_1$ к $C_1x'_2$, а

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \frac{B}{J_y - J_x} \quad (22)$$

Для нахождения J_{\max} , J_{\min} и α понадобятся значения $J_{C_1x'_1}$, $J_{C_1x'_2}$, $J_{C_1y'_1}$, $J_{C_1y'_2}$, которые находятся просто, например:

$$J_{C_1x'_1} = J_{C_1x_1} - f \cdot y_{C_1}^2 .$$

(В этой формуле знак минус вызван переходом от вспомогательной оси к центральной).

Для нахождения $J_{C_1x'_2}$ используем равенство

$$J_{C_1x'_1} + J_{C_1y'_1} = J_{C_1x'_2} + J_{C_1y'_2} = A ; \quad J_{C_1x'_2} = A - J_{C_1y'_2} .$$

В случае, если $J_{C_1y'_2} < J_{C_1x'_2}$, названия осей надо поменять.

Расчетом по приложению 7 и нанесением на профиль главных осей инерции C_1X и C_1Y заканчивается определение геометрических характеристик профиля лопатки, необходимых для расчета ее на прочность

Глава II

ПРОФИЛИРОВАНИЕ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК

§ 7. Подготовительные работы

Переходя от построения профилей изолированных решеток к профилированию целой лопатки, работающей в реальных условиях, необходимо учитывать не только газодинамические требования, но и требования прочности лопатки и технологичности ее поверхностей.

Для префилирования лопаток необходимо знать изменения параметров потока газа по высоте канала. Эти данные получаются в результате расчета ступени по многим сечениям.

Угол входа потока в сопловой аппарат первой ступени турбины постояен и равен 90° , угол выхода, в зависимости от выбранного закона закрутки, может быть постоянным (при законе $\alpha_1 = const$) или переменным - при других законах. Аналогичное замечание относится и к углу выхода из второй и последующих ступеней; что же касается угла входа в аппараты этих ступеней, то он зависит от рабочего колеса предыдущей ступени и в общем случае не равен 90° и не постояен по высоте лопатки.

Форма лопатки существенно зависит от выбранного закона закрутки потока по радиусу. Однако последовательность проектирования пера и основные приемы его графического образования имеют достаточно общий характер, поэтому в данном пособии выбор закрутки не обосновывается и расчет потока по многим сечениям не приводится.

Предполагается, что эти вопросы известны читателю, например по материалам [4,5,7,10,14,20] и др.

Будем считать, что заданными, точнее, полученными в результате расчета по среднему радиусу и по многим сечениям, являются: ширина венца $S_{с.л.}$ (рис.2), распределение по высоте лопатки углов входа и выхода потока α_0 и α_1 , значения приведенных адиабатических скоростей λ_{200} , статических давлений p_0 и p_1 и скоростей C_0 и C_1 , а также расход газа через сопловой аппарат G .

Такие данные могут быть, в частности, получены в результате расчетов турбин, выполненных в соответствии с [20] и [21].

Подготовка к профилированию, т.е. работа, которую целесообразно провести до начала построения профилей в различных сечениях лопатки, включает в себя следующие моменты:

I. Определение конструктивных углов и эффективного угла выходе

Готовясь к профилированию, следует построить на миллиметровой бумаге эпюры распределения углов α_0 и α_1 вдоль радиуса. Затем, используя указания в § 2 рекомендации, подсчитать и построить эпюру значений конструктивных углов входа $\alpha_{0к}$ и эффективных углов выхода $\alpha_{1эф}$ (рис.14). При проектировании сопловых лопаток рекомендации с соблюдением равенства конструктивных и эффективных углов выхода, как правило, легко выполняемы, поэтому принимают за $\alpha_{1к}$ значения угла $\alpha_{1эф}$.

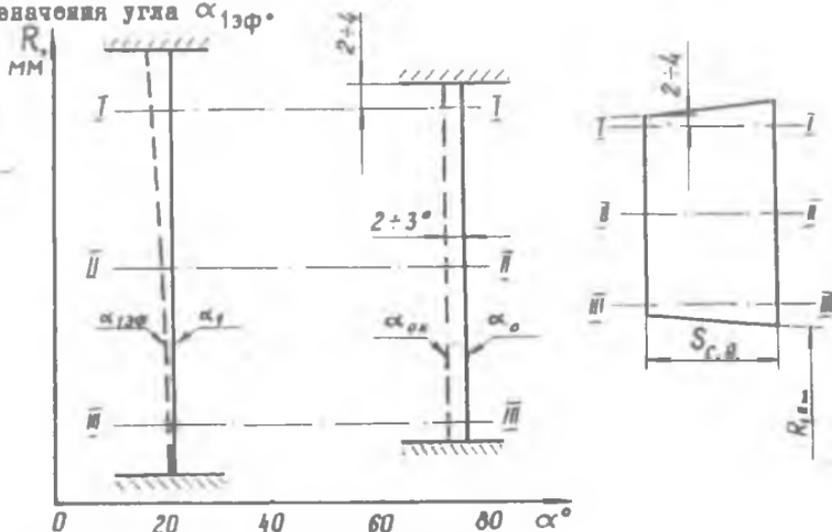


Рис. 14.

Следует подчеркнуть, что при постоянном по высоте угле выхода α_1 эффективный угол не остается неизменным: характер его изменения зависит от того, какая часть лопатки охвачена сверхзвуковым потоком на выходе (рис.15). Если поток по всей высоте лопатки дозвуковой, то (так как с уменьшением $\lambda_{1a\delta}$ отклонение потока увеличивается, см. приложение I) эффективный угол выхода от втулки к периферии падает (рис.15а). Монотонный характер эпюры $\alpha_{13\phi}$ нарушается, если на части высоты лопатки имеет место сверхзвуковое течение (рис.15б). Если же весь поток на выходе из аппарата сверхзвуковой, то изменение $\alpha_{13\phi}$ по радиусу вновь становится монотонным, однако от втулки к периферии эффективный угол увеличивается (рис.15в). На рис.15г показано изменение углов при дозвуковых перепадах и при законе $\frac{C_u}{R} = const$, который используется при проектировании ступеней с относительно длинными лопатками.

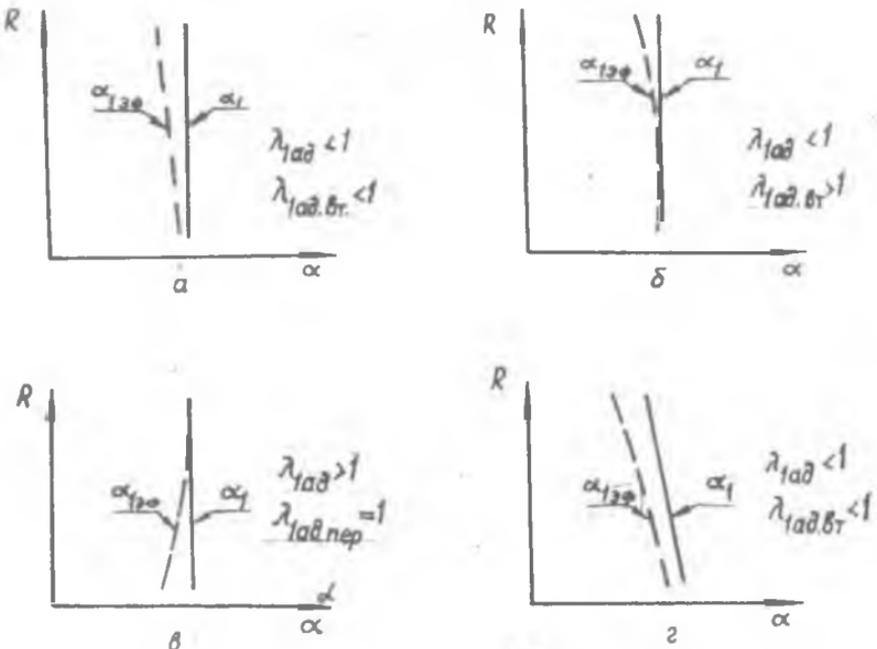


Рис. 15.

2. Выбор контрольных сечений. Контрольные сечения выбирают параллельными оси турбины^{Ж)} и, следовательно, непараллельными образующим конических поверхностей, ограничивающих меридиональный тракт.

Крайние контрольные сечения выбирают отстоящими от радиальных границ потока на 2+4 мм по входной кромке (сеч. I-I и III-III на рис. I.4). Расстояние от контрольных сечений до границ потока, за меренное по выходной кромке, зависит от конусности ограничивающих тракт поверхностей и достигает 10+15 мм.

Промежуточные сечения отстоят друг от друга на расстоянии 10+60 мм.

При выборе положения крайних и промежуточных сечений необходимо учитывать следующее:

а) интервалы между сечениями должны быть равными между собой, желательно кратными пяти, или, по крайней мере, равными целым числам миллиметров. Это упрощает использование деталей универсально-сборочных приспособлений (УСП) для контроля пера;

б) желательно, чтобы одно из контрольных сечений располагалось на среднем радиусе;

в) могут понадобиться дополнительные контрольные сечения в местах с резким изменением эспры углов входа или выхода. (Такая эспра будет иметь место, если в расчете ступени по многим сечениям учтены переменные по высоте потери энергии.)

3. Выбор числа лопаток. От правильного выбора числа лопаток зависит соблюдение в оптимальных пределах относительного шага $\frac{t}{d}$ в различных сечениях аппарата, прочность как самих сопловых, так и рабочих лопаток, расположенных за ними. Влияние сопловых лопаток на прочность рабочих объясняется окружной неравномерностью потока, выходящего из соплового венца, которая и приводит к возбуждению колебаний рабочих лопаток.

Пока не известен метод априорного определения числа лопаток - сопловых и рабочих, - удовлетворяющий всем требованиям. Нередко первоначально выбранное число лопаток уточняется в ходе префилирования, а также в результате газодинамической и прочностной доводки турбины.

^{Ж)} Контрольные сечения перпендикулярны радиусу турбины, проведенному через центр тяжести корневое сечения.

Оценим число лопаток Z_{CA} , исходя из требования о соблюдении относительного шага в оптимальных (с точки зрения минимума профильных потерь) пределах.

Для дальнейших рассуждений важно то обстоятельство, что сопловые лопатки (в отличие от рабочих) закручены вдоль радиуса сравнительно мало, особенно если выбран закон профилирования $\alpha_1 = \text{const}$ или близкий к нему. Следовательно, ширина решеток определяется, главным образом, величинами хорд профилей, которые при соблюдении требований к относительному шагу уменьшаются от периферии к втулке. Именно поэтому и ширина сопловых лопаток уменьшается от периферии ко втулке (за исключением случая использования некрученных лопаток постоянного профиля).

До начала профилирования наиболее достоверно можно судить о ширине периферийного сечения S_I , ибо она незначительно отличается от известной из газодинамического расчета ширины венца S_{CA} . Если сопловые лопатки крепятся к наружному кольцу посредством полок, то, из-за необходимости образовать плавный переход от полок к перу, $S_I = S_{CA} - (2+4)$ мм; если лопатки вставляются в прорези наружного кольца и привариваются к нему, то $S_I \approx S_{CA}$.

Теперь с учетом (II) и (I4) число лопаток определится зависимостью

$$Z_{CA} = \frac{\pi D_I \cdot \sin \gamma}{(\bar{t})_{opt_I} \cdot S_I} \quad (23)$$

Полученное значение следует округлить до ближайшего целого числа, которое и принять за число лопаток проектируемого аппарата.

Если проектант располагает прототипом соплового аппарата примерно с такими же углами входа и выхода потока на среднем диаметре, то число лопаток проектируемого аппарата по сравнению с известным $Z_{узб}$ определится из соотношения

$$Z = Z_{узб} \cdot \frac{D_{cp}}{D_{cp.узб.}} \cdot \frac{S_{узб.}}{S} \quad (24)$$

где $D_{cp.узб.}$, $S_{узб.}$ - соответственно средний диаметр и ширина венца аппарата - прототипа.

Такой выбор числа лопаток как соплового аппарата, так и рабочего колеса, позволяет иметь на проектируемом венце тот же уровень относительных шагов, что и у венца - прототипа.

§ 8. Выбор схемы конструкции лопаток. Проектирование пера некрученой лопатки постоянного профиля (НЛПП)

Прежде всего следует выяснить, нельзя ли для проектируемого аппарата выполнить лопатку некрученой постоянного профиля (рис.1а) как наиболее простую и технологичную. Решающим здесь является изменение относительного шага: если лопатка имеет постоянный по высоте профиль h , следовательно, постоянную хорду, то относительный шаг изменяется пропорционально радиусу

$$\bar{t} = \frac{2\pi}{z_{с.а.} \cdot b} R$$

В этом случае, выбрав число лопаток по оптимальному \bar{t} в среднем сечении, будем иметь редкую решетку на периферии и густую - у втулки. Эти отступления тем значительнее, чем больше относительная высота лопатки $\frac{h}{D_{ср}}$. Для коротких лопаток ($\frac{h}{D_{ср}} \leq \frac{1}{8}$) изменения относительного шага невелики и не ведут к заметному ухудшению параметров ступени^{*}). Поэтому их целесообразно проектировать как НЛПП.

Профилирование такой лопатки сводится к построению среднего сечения изложенным выше методом построения профиля конфузурной решетки (§ 4). Построив его и приняв полученный профиль неизменным по всей высоте, определяют, какие эффективные углы будут при этом в периферийном и втулочном сечениях. Чем больше кривизна спинки на участке косога среза, тем больше $\alpha_{1эф}$ на периферии по сравнению с $\alpha_{1эф}$ у втулки. Значения этих углов в общем случае не совпадают со значениями, полученными в результате расчета по многим сечениям. Но если был принят закон профилирования $\alpha_1 = const \bar{t}$ и $\lambda_{1ад} \approx 1,0$, то эти отличия невелики и ими можно пренебречь. В противном случае следует повторить расчет по многим сечениям, в котором принять не закон $\alpha_1 = const$, а полученную эпюру $\alpha_{1эф}$. (Повторения этого расчета можно избежать, если уже при выборе за-

^{*}) Некоторые авторы (см., например, [10,20]) считают короткими такие лопатки, относительная высота которых $\frac{h}{D_{ср}} \leq \frac{1}{11} \approx \frac{1}{12}$

кона закрутки определить возможность использования НЛПШ, построить решетку по данным расчета по среднему диаметру, снять эпюру $\propto_{13\phi}$, которую и использовать в расчете по многим сечениям).

При сравнительно большой длине, чтобы не снизить к.п.д. турбины, лопатки сопловых аппаратов должны иметь переменную, увеличивающуюся от втулки к периферия хорду, и поэтому выполняются переменного профиля.

Для лопаток с переменной хордой, и следовательно, с переменными профилями возникает вопрос об их взаимном расположении. От того, что принимают за конструктивную базу лопатки в аппарате, сечения лопаток (если смотреть на нее вдоль радиуса) могут быть совмещены по выходным кромкам (рис.17 а), по входным (рис.17 б), могут как бы «нанизываться» на прямую, проходящую через центры окружностей максимальной толщины (рис.17 в), и т.д.

Очевидно, проектирование отдельных сечений пера лопатки может проводиться независимо друг от друга. Этот метод прост, но он не позволяет получить технологичные поверхности корыта и спинки. Лучше, когда при профилировании сечений имеют в виду образование или закономерной технологичной поверхности.

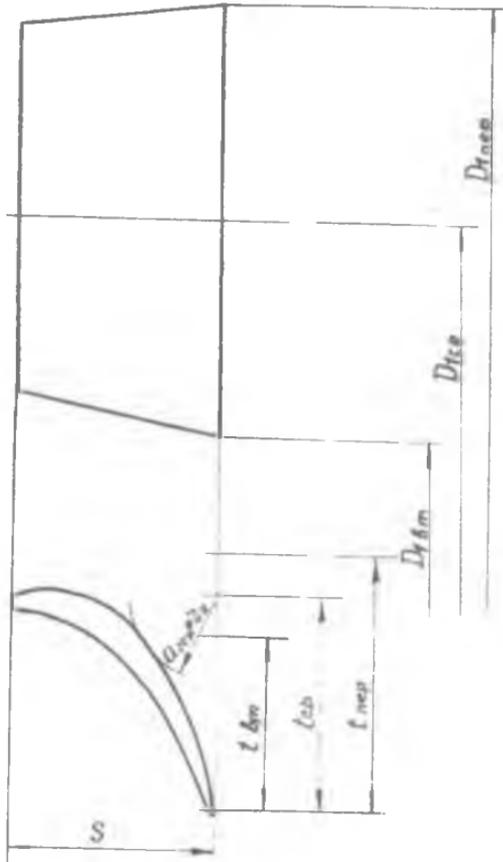
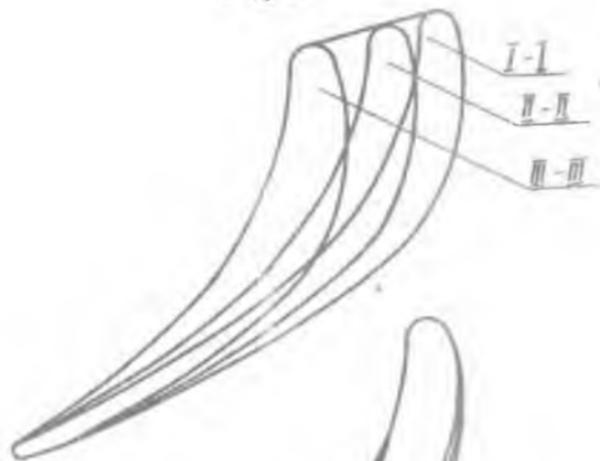
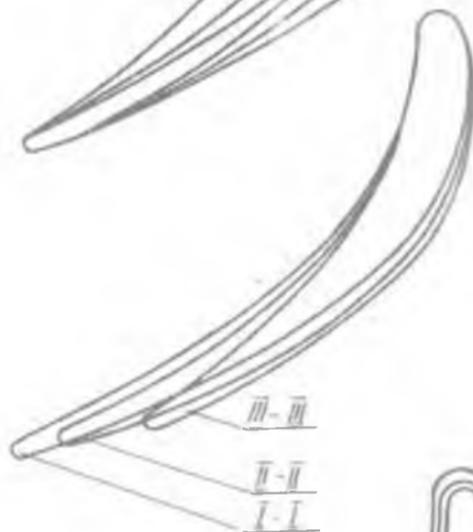


Рис. 16.

a)



б)



в)

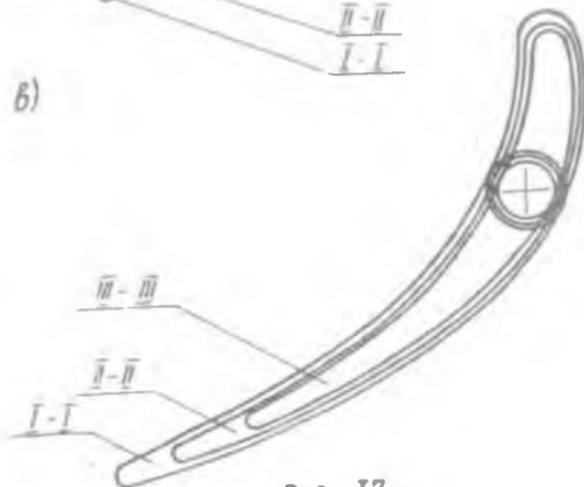


Рис. 17.

§ 9. Профилирование лопаток с выходной кромкой,
перпендикулярной оси турбины

Рассмотрим подробнее профилирование сопловых лопаток, выходные кромки которых расположены радиально и, следовательно, перпендикулярно оси аппарата (рис. I7, а). Такая схема нашла широкое распространение в современных авиационных газотурбинных двигателях.

В этой конструкции контрольные сечения лопатки нормальны выходной кромке.

Один из простых способов профилирования состоит в следующем. Выбрав число лопаток по периферийному сечению, строят независимо друг от друга два сечения (периферийное и втулочное), непременно сохраняя одинаковыми лишь радиус выходной кромки (рис. I8, сеч. I-I и III-III). Совмещают выходные кромки этих сечений и перемещением прямой линии по контурам исходных профилей образуют поверхности корыта и спинки. Любой промежуточный профиль (например, сечение II-II) определяется как сечение получающейся при этом линейчатой поверхности плоскостью, перпендикулярной выходной кромке.

Более технологичной является другая линейчатая поверхность - цилиндрическая. Так, поверхность ИДШ является прямой цилиндрической. Образующие ее перпендикулярны контрольным сечениям. Применение цилиндрических поверхностей с образующими, наклонными к контрольным сечениям, приводит к тому, что у такой лопатки профили сечений, перпендикулярных выходной кромке, отличаются друг от друга; контуры же сечений, нормальных образующим, одинаковы (рис. I9). Из-за равенства длин хорд такая лопатка в меридиональном сечении выглядит сужающейся от периферии ко втулке с наклонной входной кромкой.

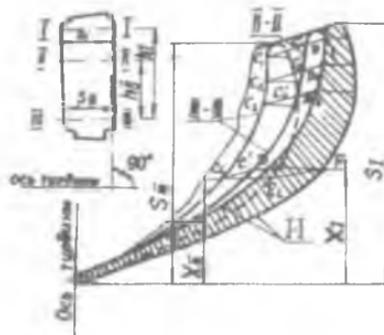


Рис. I8.

чении I-I и указанный прием повторяется.

Аналогичным перемещением контура корыта сечения I-I (вдоль линии $\pi\pi$) строят контур корыта сечения III-III (рис.20,в). Величина смещения СД в первом варианте может быть выбрана произвольно. Целесообразно следить за тем, чтобы толщина (d_{III}) образуемого таким образом профиля не превышала толщины профиля I-I.

Затем, приняв за радиус r_{III} , дугу окружности такого радиуса сопрягают с контурами корыта и спинки (рис.20,г). При этом могут быть использованы линии, полученные не только смещением контуров сечения I-I, но и участки, являющиеся плавным продолжением их выше точек ξ и η . Выполнив сопряжение, проверяют угол входа $\alpha_{\text{ок}}$ и относительный шаг $\frac{r_{\text{III}}}{\delta}$. Если угол не соответствует расчетному, а величина относительного шага выходит за допустимые пределы, то изменяется радиус входной кромки. В случае, когда этого сделать нельзя, используют такие приемы: перестраивают контур корыта, при этом соответствующий исходный контур перемещают указанным выше образом на новую величину (СД), отличную от выбранной в первый раз; изменяют контур корыта сечения I-I, в том числе и направление прямолинейного участка; изменяют контур спинки сечения I-I на входе.

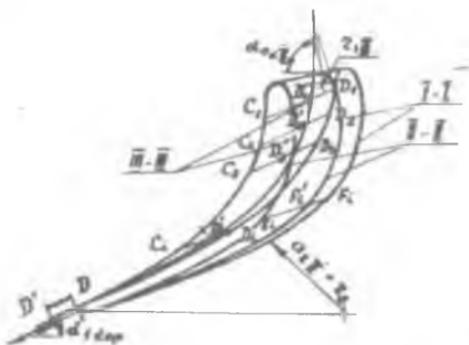


Рис. 21.

значения углов $\alpha_{\text{вход}}$ могут не совпадать с расчетными. При более тщательном профилировании в этом случае прибегают к развороту всех лопаток в сопловом аппарате до совпадения проходного сечения аппарата с расчетным значением.

Для построения профиля промежуточного сечения II-II (рис.21), находящегося на расстоянии h_{II} от сечения III-III (рис.19), на образующих откладывают равные отрезки $C_i D'_i = C_i D_i \frac{h_{\text{II}}}{h_x}$. Аналогично отрезками $E_i F'_i$ определяют точки спинки этого сечения. Проверкой необходимого числа сечений заканчивается проектирование пера лопатки.

В промежуточных сечениях

§ 10. Профилирование лопаток с выходной кромкой,
наклонной к оси турбины

Профилирование сопловых лопаток изложенными выше методами нередко приводит к тому, что относительные шаги \bar{t} втулочных сечений оказываются меньше оптимальных. Поэтому здесь имеет место как увеличение потерь, так и затяжеление турбины.

Более благоприятной в этом смысле является конструкция соплового аппарата, при которой, кроме входной кромки, наклонена в противоположную ей сторону и выходная (рис.22, пунктир). В этом случае удастся снизить вес не только за счет уменьшения хорд втулочных сечений, но и за счет уменьшения длины турбины благодаря более равномерному осевому зазору.

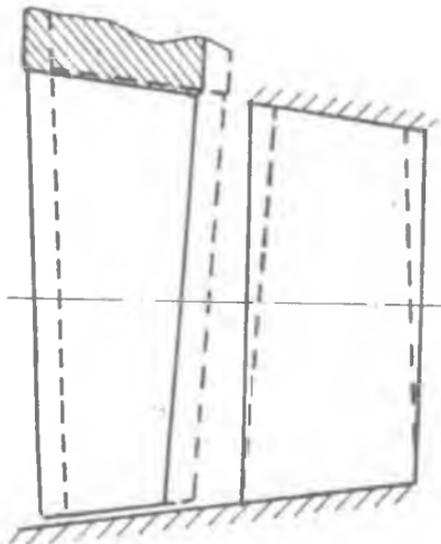


Рис. 22.

При профилировании таких лопаток удобно воспользоваться коническими поверхностями, образуя ими поверхности корыта и спинки.

Процесс профилирования сводится к следующим приемам. По ширине периферийного сечения I-I и оптимальному шагу определяют число лопаток аппарата. Приняв $Z_{с.а.}$, подсчитывают $t_{ш}$ и по t_{opt} вычисляют $\delta_{ш}$; кроме того, используя приложение № 4 и формулу (II), оценивают значения $\gamma_{ш}$ и $S_{ш}$.

В первом приближении принимается, что входная и выходная кромки наклонены одинаково. Получив из этих условий положение в плане (рис.23,а)

выходной кромки втулочного сечения, проверяют, каков будет угол $\alpha_{1эфш}$ и угол отгиба $\delta_{ш}$, если контур спинки сечения II-II сольется с таковым для сечения I-I. Опыт показывает, что в этом случае эффективный угол выхода втулочного сечения оказывается больше расчетного.

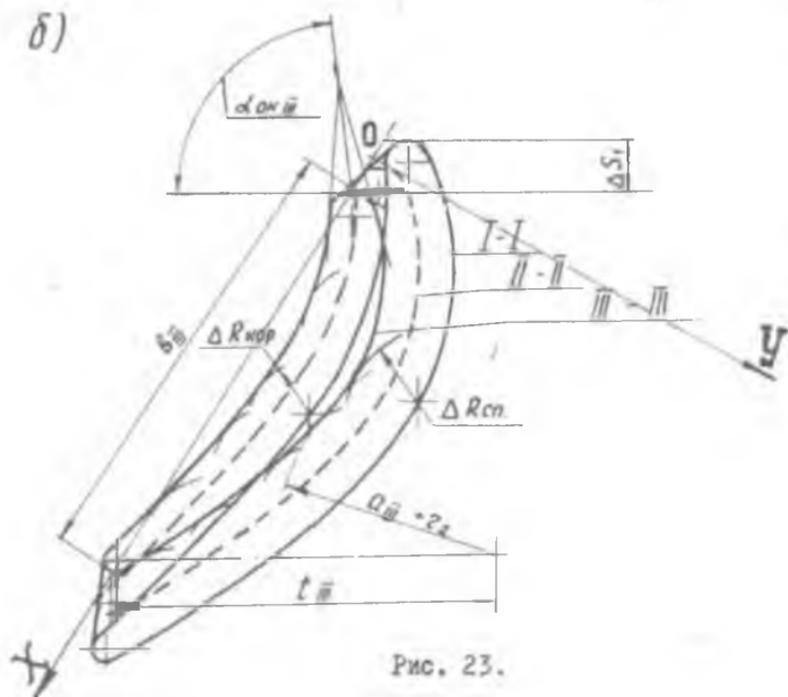
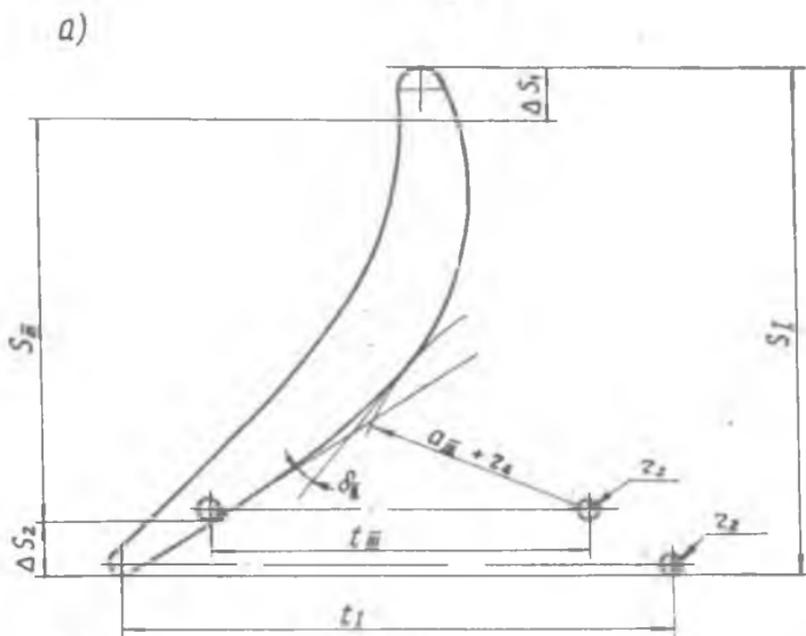


Рис. 23.

Тогда представим, что поверхность спинки образована обкаткой прямого кругового конуса по контуру спинки сечения I-I, причем диаметр сечения конуса, образующего спинку профиля III-III, больше чем для I-I. Исходя из этого, для построения спинки втулочного профиля проведем эквидистанту к спинке профиля I-I на некотором расстоянии $\Delta R_{сп}$ (рис.23,б). Выполнив уже знакомые операции, определим углы $\alpha_{1зфш}$ и $\delta_{ш}$. Варьируя величиной $\Delta R_{сп}$, в две-три попытки можно найти контур спинки, при котором эффективный угол выхода совпадает с расчетным, а значение угла отгиба будет лежать в желаемом диапазоне.

Для этого случая вычерчивается корыто профиля I-I, эквидистанта к которому (величина $\Delta R_{кор}$) выбирается так, чтобы контур корыта коснулся уже выбранной выходной кромки. При ограничении, наложенном шириной решетки S, радиус скругления входной кромки r_1 получается однозначным. У полученного таким образом профиля проверяют конструктивный угол $\alpha_{окш}$ и фактическое значение хорды $b_{ш}$.

Если окажется, что конструктивный угол входа больше расчетного или, если $r_{1ш} > r_{1х}$, то исправить положение можно за счет некоторого увеличения ширины $S_{ш}$ и одновременного уменьшения ΔS_1 , ΔS_2 . Тогда вновь проверяют углы $\alpha_{окш}$ и $\delta_{ш}$ и при необходимости перестраивают спинку профиля III-III, изменив $\Delta R_{сп}$.

После построения периферийного и втулочного сечений, профили промежуточных сечений легко определяются исходя из линейчатости конических поверхностей (рис.23,б).

§ II. Определение сил, действующих на лопатки. и расчет на прочность

Схема действия газовых сил на лопатки соплового аппарата показана на рис.24. Лопатки находятся под воздействием разности давлений по обе стороны венца и динамических усилий, возникающих от изменения направления и скорости газа при течении через него. Если тракт аппарата конический, то давления на конические поверхности дают составляющие в осевом направлении, которые необходимо учитывать при расчете.

Расчет ведется по уравнению количества движения (I-ое уравнение Эйлера) в проекциях на оси U и A.

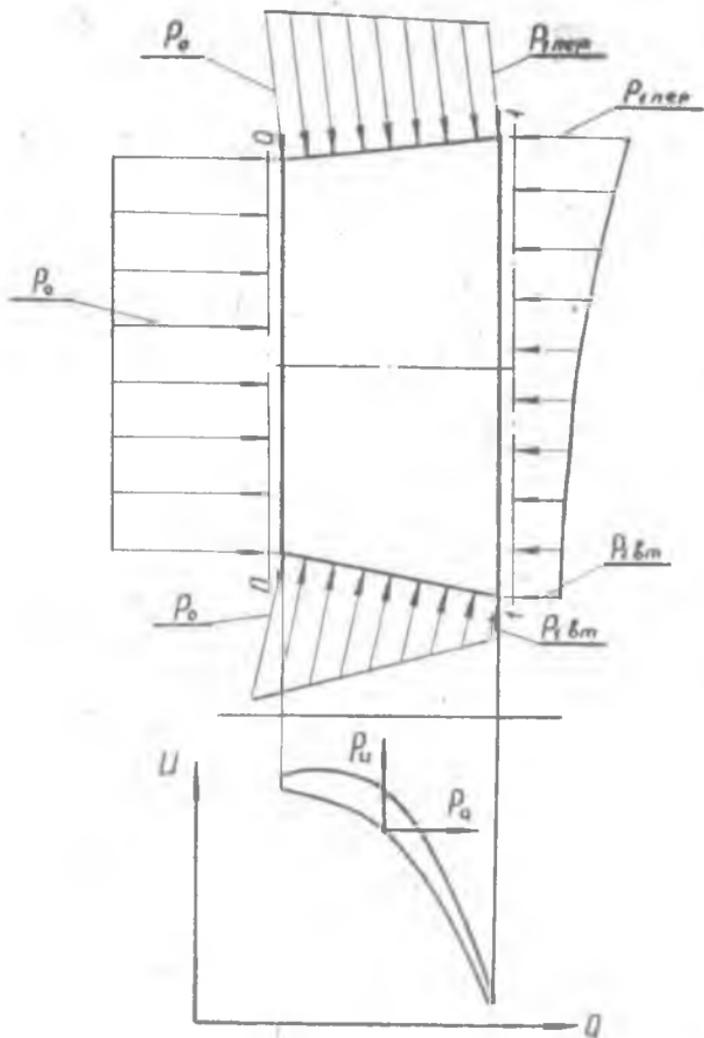


Рис. 24.

На рис.24 направление U принято противоположное фактическому направлению вращения ротора. Это сделано для того, чтобы усилие P_U было положительно и расчетная суммарная газодинамическая сила на лопатки совпадала по направлению с действительным. Ось q направлена параллельно оси турбины вниз по потоку.

Принимая линейными эпюры давлений на конические поверхности и заменив переменное по радиусу давление в сечении I-I давлением в среднем сечении, получим следующее выражение для подсчета осевого усилия P_a , действующего на одну лопатку:

$$P_a = \frac{1}{z_{с.л.}} \left[p_0 F_0 + \frac{P_a + P_{пер}}{2} F_{пер} + \frac{P_a + P_{вм}}{2} F_{вм} - p_1 F_1 - \frac{G}{g} (C_{1a} - C_{0a}) \right] \quad (25)$$

Здесь

$$F_{пер} = \frac{\pi}{4} (D_{1пер}^2 - D_{0пер}^2), \quad F_{вм} = \frac{\pi}{4} (D_{0вм}^2 - D_{1вм}^2).$$

Окружное усилие определится по формуле

$$P_u = \frac{G}{g \cdot z_{с.л.}} (C_{0u} - C_{1u}). \quad (26)$$

Далее, приближенно считая, что усилие на лопатку распределено по ее высоте равномерно, определяем интенсивность распределенных нагрузок:

$$q = \frac{P_a}{h_{с.л.}}, \quad (27)$$

$$q = \frac{P_u}{h_{с.л.}}. \quad (28)$$

Моменты сил, действующих на лопатку, зависят от способа крепления лопатки в аппарате. Распространенными являются следующие способы:

- а) лопатка устанавливается в прорези наружного и внутреннего колец (например, лопатка I-й ступени турбины);
- б) лопатка закреплена неподвижно к наружному кольцу (лопатки последних ступеней).

В первом случае расчетной схемой может служить балка на двух опорах с равномерно распределенной нагрузкой. Здесь максимальный момент в среднем сечении.

Второй случай считается как консольная балка с равномерно рас-

пределенной нагрузкой. Здесь максимальный момент - в месте заделки.

Определив наиболее опасное сечение, рассчитаем его геометрические характеристики методом, изложенным в § 6. Имея положение главных осей инерции, определяем величину нагрузки в направлении главных осей

$$\left. \begin{aligned} q_x &= q_a \cdot \sin \alpha_2 - q_u \cdot \cos \alpha_2, \\ q_y &= q_a \cdot \cos \alpha_2 + q_u \cdot \sin \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

где α_2 - угол между осью X и осью u .

Определим изгибающие моменты относительно главных осей.

В первом случае (расчетная схема - балка на двух опорах) изгибающие моменты равны:

$$M_x = \frac{q_y \cdot h^2}{8}, \quad M_y = \frac{q_x \cdot h^2}{8} \quad (30)$$

Во втором случае (расчетная схема - консольная балка):

$$M_x = \frac{q_y \cdot h^2}{2}, \quad M_y = \frac{q_x \cdot h^2}{2} \quad (31)$$

Прочность сечения лопатки проверяется в одной из трех характерных точек (на кромках и на спинке), наиболее удаленных от оси минимальной жесткости X (точки А, В и С - рис.25).

Для точек i ($i=A, B, C$) определяем моменты сопротивления

$$W_{ix} = \frac{J_x}{y_i}, \quad W_{iy} = \frac{J_y}{x_i}$$

и напряжения изгиба

$$\sigma_{ui} = \frac{M_y}{W_{iy}} + \frac{M_x}{W_{ix}} \quad (32)$$

(При определении напряжений следует тщательно разобраться в направлениях действия моментов сил и в знаках моментов сопротивления. Положительное значение σ_{ui} должно соответствовать напряже-

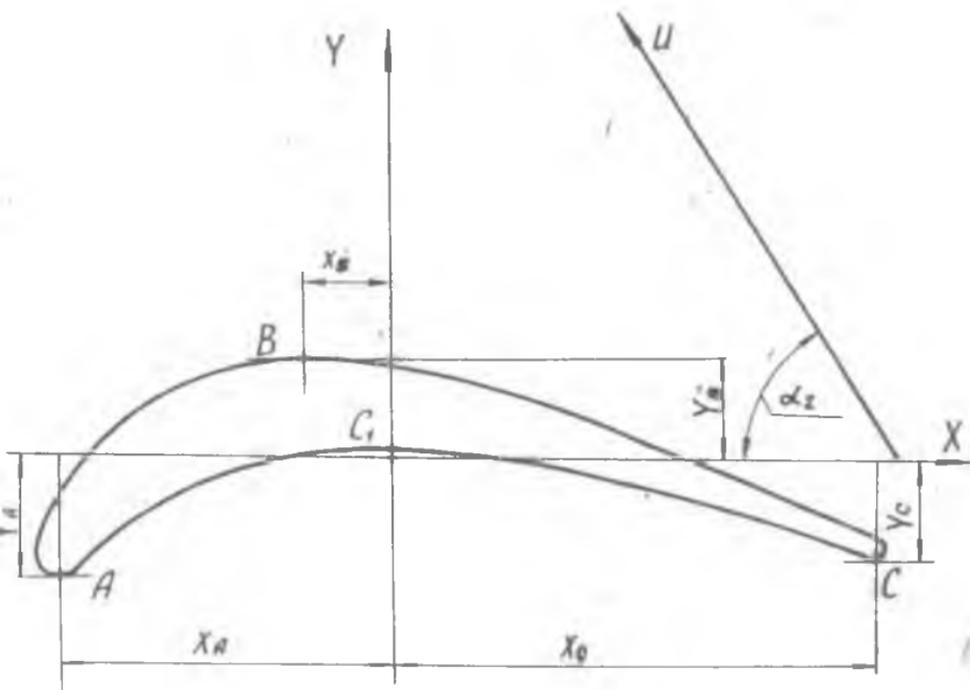


Рис. 25.

нию растяжения лопатки в точке i профиля.)

Для определения запаса прочности необходимо найти предел длительной прочности, который для выбранного материала лопатки зависит от ее температуры и времени работы.

Время работы определяется назначением турбины, а температура материала равна температуре торможения потока.

Обычно температура потока переменна по радиусу, и максимальная температура отличается от среднемассовой:

$$T_{C_{\max}}^* \approx (1,04 \div 1,1) T_{C_{\text{ср}}}^* .$$

Поэтому для расчетов на прочность за температуру материала принимают максимальную температуру торможения, суммированную с некоторой величиной, определяемой окружной неравномерностью температурного поля. Практически эта величина равна $\sim 50^\circ\text{C}$.

Для часто используемых материалов в приложении 8 приведены необходимые данные о пределах их длительной прочности $\sigma_{\delta T}^*$. Как

известно, за предел длительной прочности принимается напряжение, которое при данной температуре t вызывает разрушение металла через промежуток времени τ .

Для точки, имеющей максимальное значение σ_u , определяем запас прочности

$$K = \frac{\sigma_{\text{в.т}}^t}{\sigma_{\text{max}}},$$

который должен быть не менее двух.

Если $K < K_{\text{дон}}$, то профиль перестраивается с увеличением его площади. В противном случае лопатка утоняется или делается полой

Проектирование пера заканчивается координированием профилей его контрольных сечений. С этой целью выбирает единую для всех сечений систему координат (см., например, систему XOU на рис.23) и в ней измеряют ординаты точек контуров спинки и корыта всех профилей с равномерным интервалом (в $I+4$ мм) между абсциссами. Измеренные ординаты точек, прежде чем их внести в чертеж, проверяют на плавность контура (см. материалы §§ I5, I7).

Глава II

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК

Рабочая лопатка - одна из наиболее ответственных деталей газовой турбины. Она работает в условиях высоких температур и напряжений и должна удовлетворять ряду требований газовой динамики, прочности и технологии производства. Указанные особенности работы лопатки накладывают отпечаток на приемы и методы ее проектирования.

§ 12. Подготовительные работы

В результате расчета ступени по средним параметрам и по многим сечениям получены ее основные данные и параметры потока газа по высоте канала. Считаем заданными следующие величины: $S_{р.к}$ - ширина венца, h - высота канала, $\beta_1 = f(R)$, $\beta_2 = f(R)$ - эллипсы распределения углов входа и выхода по высоте лопатки, $\lambda_{2ад}$ - значения приведенной скорости, ω_1 , ω_2 (c_1, c_2) - значения относительных (абсолютных) скоростей на входе и выходе, G - секундный расход газа через рабочее колесо, полная температура на входе в рабочее колесо - $T_{1в}^*$. Для построения профилей в различных сечениях лопатки необходимо определить или оценить еще ряд величин.

I. Выбор конструктивных углов. При законе $\alpha_1 = const$ угол входа в рабочее колесо β_1 увеличивается от втулки к периферии, угол выхода потока из рабочего колеса β_2 в этом направлении

монотонно уменьшается, если расчет сделан в предположении, что для всех сечений значение температуры перед ступенью T_{12}^* , коэффициенты скорости φ и ψ соответственно одинаковы.

Готовясь к профилированию рабочей лопатки, следует определить углы $\beta_{1к}$ и $\beta_{2к}$ и построить на миллиметровой бумаге распределение их по высоте лопатки (рис.26).

Угол $\beta_{1к}$ выбирается по рекомендациям § 2. Так как желательно, чтобы $\beta_{2к} = \beta_{2эф}$, принимаем $\beta_{2к} = \beta_{2эф}$; $\beta_{2эф}$ определяется способом, описанным в § 2.

2. Назначение контрольных сечений. Конструктивно крайние контрольные сечения назначают отстоящими от радиальных границ потока на 2+4 мм по входной кромке. Назначаются 3 и более промежуточных сечений^{*)}, отстоящих друг от друга на расстоянии 10+40 мм.

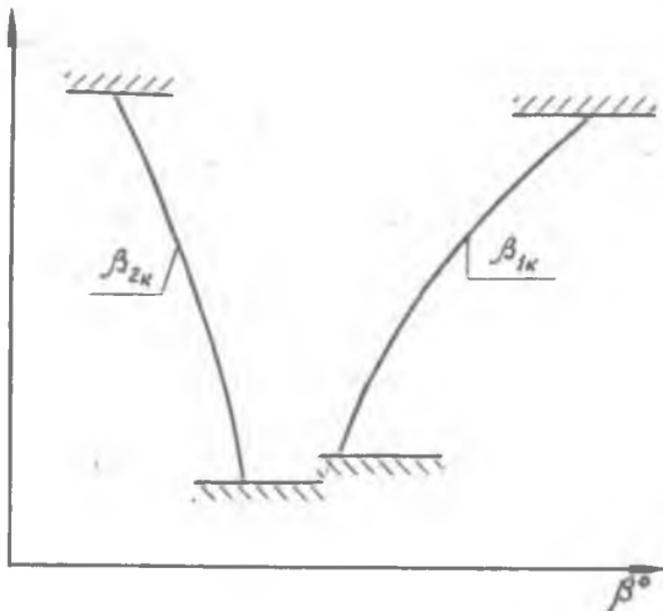


Рис. 26.

При выборе контрольных сечений следует учитывать требования и рекомендации, относящиеся к выбору контрольных сечений сопловых лопаток (§ 7).

3. Выбор числа лопаток. От правильного выбора числа лопаток зависит соблюдение в оптимальных пределах относительного шага решетки $\frac{t}{b}$ по высоте канала, прочность и вибропрочность лопаток, возможность разместить замки лопаток в диске колеса. Как отмечалось в § 7, пока не известен метод определения числа ло-

патов, удовлетворяющий всем требованиям. Часто выбранное число лопаток уточняется в ходе профилирования, а также в результате газодинамической и прочностной доводки турбины!

Оценим число лопаток $Z_{р.к.}$ исходя из требования о соблюдении относительного шага $\frac{t}{\delta}$ в оптимальных пределах. Если представляется возможность, например по прототипу, определить величину хорды в каком-либо из сечений лопатки, то по ее значению и по значению относительного шага в этом сечении может быть подсчитан шаг t и число лопаток в рабочем колесе

$$Z_{р.к.} = \frac{\pi D}{t}$$

Для нахождения хорды определяют примерное значение угла установки γ по кривой t в приложении 4; далее считают величину хорды по формуле (II).

В выполненных конструкциях турбин рабочие лопатки имеют переменную ширину: от втулки к периферии ширина лопатки уменьшается. До начала профилирования наиболее достоверно можно судить о ширине втулочного сечения $S_{\delta m}$ (рис.27), так как она незначительно отличается от известной из газодинамического расчета ширины диска $S_{р.к.}$. Величина $S_{\delta m}$ на 2-4 мм меньше $S_{р.к.}$ из-за необходимости образовать плавный переход от пера к полке замка, а также вследствие наклона кромок. В соответствии с этим оцениваем $S_{\delta m}$:

$$S_{\delta m} = S_{р.к.} - (2 \div 4) \text{ мм}.$$

Теперь остается оценить значение относительного шага $\frac{t}{\delta}$. Оптимальное значение $\frac{t}{\delta}$ увеличивается с увеличением конфузурности решетки $K = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2}$. Конфузурность каналов рабочих колес растет от втулочного сечения к периферийному, поэтому и оптимальные значения относительного шага увеличиваются в том же направлении. Оптимальное значение $\frac{t}{\delta}$ определяем по графику в приложении 5. Теперь подсчитываем число лопаток по формуле

$$Z_{р.к.} = \frac{\pi D_{\delta m}}{\left(\frac{t}{\delta}\right)_{opt} \cdot \delta} = \frac{\pi D_{\delta m} \sin \gamma}{\left(\frac{t}{\delta}\right)_{opt} \cdot S_{р.к.}}$$

Если есть прототип рабочего колеса, то $Z_{р.к.}$ определяется по (24), только теперь в (24) $D_{ср.изв.}$, $S_{изв.}$ - средний диаметр и

I	2	3
Угол установки	γ	γ - определяется по графику в приложении 4.
Относительный шаг	t/b	$\frac{t}{b}$ - определяется по графику в приложении 5.
Входная кромка	$z_1(d_1)$	$\frac{z_1}{b} = 1,89 \frac{z_2}{b} - 0,00204 K_k + 0,0138$ $\frac{z_1}{b} = 0,1469 \frac{z_2}{b} + 0,00205 K_k + 0,1866 d_m - 0,0004,$ <p>где $K_k = \frac{\sin \beta_{1k}}{\sin \beta_{2k}}$ $\bar{d}_m = \frac{d_m}{b}$</p>
Выходная кромка	$z_2(d_2)$	$d_2 = (0,01 + 0,05) b$ <p>Для рабочих лопаток $(d_2)_{\text{пер}} > (d_2)_{\text{вм}}$</p>
Относительное положение максимальной толщины	\bar{X}_{d_m}	$\bar{X}_{d_m} = 0,283 - 0,362 \bar{X}_p + 0,894 \bar{X}_p^2,$ <p>где $\bar{X}_p = \frac{\sin \frac{90^\circ - \beta_{1k}}{2} \cdot \cos \frac{90^\circ - \beta_{2k}}{2}}{\sin \frac{\theta_k}{2}}$ определяется по графику в приложении 2. При $\beta_1 \geq 90^\circ$ $\bar{X}_{d_m} = 0,22 + 0,29$</p>
Угол изгиба профиля	θ_k	$\theta_k = 180^\circ - (\beta_{1k} + \beta_{2k})$
Максимальная толщина	d_m	$d_m = 2 \left[\frac{f}{1,066 L_p} - \bar{X}_{d_m} z_1 - (1 - \bar{X}_{d_m}) z_2 \right],$ <p>где L_p - определяется графиком в приложении 3, f - площадь (определяется расчетом на прочность).</p>
Угол отгиба	δ	<p>При $\lambda_{2ад} < 1,0$ $\delta \geq 10^\circ$,</p> <p>при $\lambda_{2ад} = 1,0 + 1,3$ $\delta = (7 \div 4)^\circ$</p>
Входной угол заострения	ω_1	$\omega_1 = 3,79 a z \operatorname{ctg} \frac{z_m - z_1}{(1 - \bar{X}_{d_m}) \cdot L_p}$
Выходной угол заострения	ω_2	$\omega_2 = 1,995 a z \operatorname{ctg} \frac{z_m - z_2}{(1 - \bar{X}_{d_m}) \cdot L_p}$

На этом подготовительные работы заканчиваются.

§ 13. Последовательность работ при проектировании пара
отдельными сечениями

I. Построение периферийного сечения

Профилирование рабочей лопатки целесообразно начинать с построения профиля периферийного сечения I-I. Построение проводится в масштабе 10:1 (для лопаток турбин обычных ГТД) или 20:1 (для лопаток ТНА и других малогабаритных турбин), способом, описанным в § 4. Особенности профилей периферийных сечений следующие:

1. Радиус r_2 переменен по высоте лопатки и выбирается в пределах 0,3+1,5 мм для лопаток обычных габаритов. Утонение кромок - от корня к периферии.

2. Для периферийных сечений $\omega_1 = (5+15)^\circ$, $\omega_2 = (0+5)^\circ$.

3. Угол отгибки δ выбирается по следующим рекомендациям: при $\lambda_{\omega_2 \alpha \delta} \leq 1$ $\delta = (10+30)^\circ$, при $1,3 \geq \lambda_{\omega_2 \alpha \delta} > 1$ угол δ следует выбирать в пределах 4+7 $^\circ$, чтобы не было срыва потока со спинки.

При выборе значений углов ω_2 и δ надо иметь в виду, что для получения конфузорного межлопаточного канала должно соблюдаться неравенство: $\delta > \omega_2$.

4. Максимальная толщина d_m из условий жесткости при механической обработке выбирается в пределах 1,5+3 мм.

Если проектируется лопатка без полки, то производится построение периферийного сечения на заданную толщину. Если же проектируемая лопатка должна иметь бандажную полку, то прежде всего из условия допустимых напряжений от центробежных сил определяют площадь периферийного сечения. В предположении отсутствия изгиба верхних сечений центробежными силами полки будем иметь:

$$f_{I-} = \frac{P_n}{[\sigma]} = \frac{\gamma}{g} \omega^2 R_n V_n \quad (33)$$

Здесь: P_n - центробежная сила полки;

R_n - средний радиус полки;

V_n - объем полки;

$[\sigma]$ - допустимые напряжения от центробежных сил.

Для определения объема бандажной полки необходимы ее размеры в плане и средняя толщина полки, определяемая по допустимым напряжениям изгиба консоли полки под действием центробежной силы.

Размеры «А» и «В» (рис.27,б) составляют:

$$A = \frac{2\pi R_n}{z_{max}}, \quad B = B' + 1 \text{ мм}$$

где B' равно приблизительно ширине лопатки в периферийном сечении

Средняя толщина полки определяется из того предположения, что бандажная полка в плане представляет собой прямоугольник (рис. 27,б) и профиль подлопачного сечения располагается по диагонали прямоугольника. Тогда изгибные напряжения в сечении С-С под действием центробежной силы определяются по формуле

$$\sigma = \frac{P_n \cdot \frac{1}{3} H}{W} = \frac{\frac{\gamma}{g} \omega^2 R_n \cdot \frac{B \cdot A}{2} \cdot h \cdot \frac{1}{3} H}{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot h^2}{6}} = \frac{\gamma}{g} \omega^2 R_n \frac{B^2 \cdot A^2}{h(A^2 + B^2)}$$

Так как

$$H = \frac{A \cdot B}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

Отсюда толщина полки

$$h = \frac{\gamma \cdot \omega^2 \cdot R_n \cdot B^2 \cdot A^2}{(A^2 + B^2) \cdot g [\sigma]}$$

Объем полки

$$V_n = A \cdot B \cdot h$$

Тогда площадь периферийного сечения

$$f_{II} = \frac{\frac{\gamma}{g} \cdot \omega^2 \cdot R_n \cdot A \cdot B \cdot h}{[\sigma]}$$

(При расчете полки использованы рекомендации Л.Н. Козлова.)

2. Разгрузка центробежными силами от сил газовых

После того, как построено периферийное сечение, определяют площадь промежуточных и корневого сечений, а также их взаимное расположение - определяют выносы. Под выносом понимают смещение центра тяжести данного сечения относительно центра тяжести корневого сечения.

Для определения выносов задаются законом изменения площадей сечений по высоте лопатки и считают максимальные напряжения от центробежных сил и запас прочности. Если величина запаса прочности отличается от рекомендуемой, то задаются новым законом изменения площадей сечений (или тем же, но с другими параметрами) до приведения запаса прочности в соответствии с рекомендациями.

Напряжения растяжения от центробежных сил определяются следующим образом:

$$\sigma_{P_i} = \frac{P_i}{f_i} = \frac{\gamma}{g} \omega^2 \frac{\int_{R_i}^{R_{неп}} f R dR}{f_i} \quad (34)$$

где

$$P_i = \frac{\gamma}{g} \omega^2 \int_{R_i}^{R_{неп}} f \cdot R dR ,$$

f_i - площадь сечения, в котором определяются напряжения (рис.28);

γ - удельный вес материала лопатки;

$\frac{g}{g}$ - ускорение силы тяжести;

ω - угловая скорость вращения лопатки, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$;

n - число оборотов ротора в минуту;

f - площадь сечения на радиусе R .

Интеграл в формуле (34) определяется численным или графическим способом. При численном интегрировании лопатку разбивают по высоте на 8-10 частей (желательно на 10, так как это число расчетных сечений применяется в дальнейших расчетах на изгиб), площадь в пределах каждой из них принимают постоянной (средней между двумя соседними сечениями). В таком случае центробежная сила каждого из участков равна

$$\Delta P_i = \frac{\gamma}{g} f_{i,ср} \cdot R_{i,ср} \cdot \Delta R_i \cdot \omega^2 , \quad (35)$$

где $f_{i,ср}$ - средняя площадь сечения i -го участка (на радиусе $R_{i,ср}$);
 $\Delta R_{i,ср}$ - длина участка.

Суммируя ΔP_i , полученные для каждого участка, находят результирующую силу P_i в любом сечении, а по ней и напряжения растяжения, затем можно приступить к определению выносов. Пусть

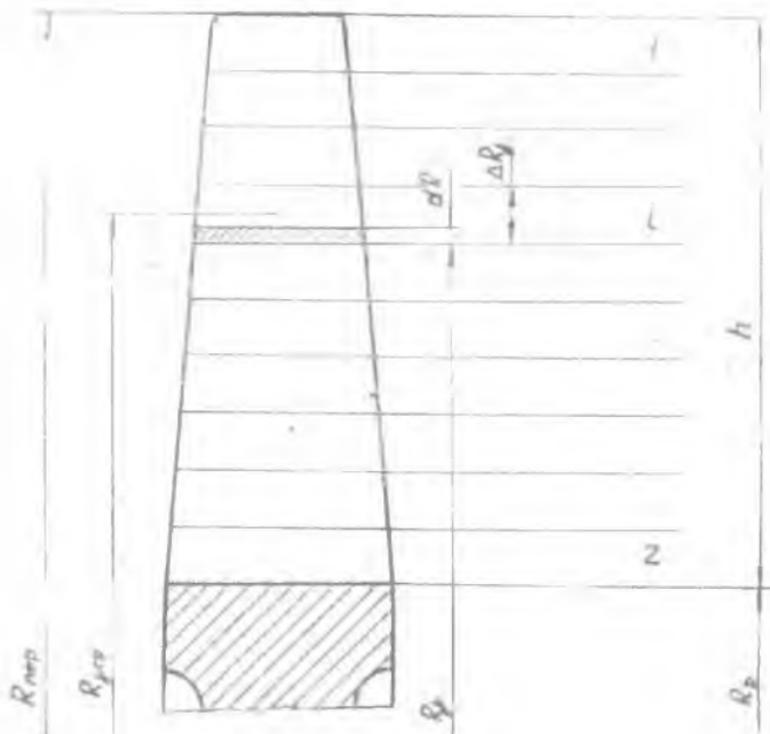


Рис. 28.

выносы оси лопатки изменяются по линейному закону и заданная компенсация осуществляется в корневом сечении. Задаемся коэффициентом компенсации K ($K = 0,5 \pm 0,6$). Находим изгибающие моменты сил давления газов в окружном (u) и осевом (α) направлениях, для чего предварительно считаем расход газа через каждый участок, приходящийся на одну лопатку (используем здесь разбивку на участки, принятую при расчете σ_p)

$$G_j = \frac{2\pi}{z_{\text{рк}}} \cdot R_{\text{ср}} \cdot (C_{2\alpha} \cdot \gamma_2)_j \cdot \Delta R_j$$

где γ_2 - весовая плотность газов.

Составляющие сил давления газов, действующие на j -й участок:

$$P_{uj} = \frac{G_j}{g} (C_{1u} \pm C_{2u})_j$$

$$P_{\alpha j} = \frac{G_j}{g} (C_{1\alpha} - C_{2\alpha}) + (p_1 + p_2) t_j \cdot \Delta R_j$$

Теперь изгибающие моменты сил давления газов в корневом сечении:

$$M_{a_{\beta m}}^{\Gamma} = \sum_{j=1}^n P_{u_j} \cdot X_{j_{\text{ср}}} \\ M_{u_{\beta m}}^{\Gamma} = - \sum_{j=1}^n P_{a_j} \cdot X_{j_{\text{ср}}}$$

где $X_{j_{\text{ср}}} = R_0 - R_{j_{\text{ср}}}$ (рис.28).

Изгибающий момент положителен, когда он стремится осуществить поворот по часовой стрелке, если смотреть с конца положительного направления оси к началу координат.

Далее определяем вынос:

$$a_{\text{пер}} = -h_{\text{ср}} \frac{\kappa \cdot M_{u_{\beta m}}^{\Gamma}}{\sum_{j=1}^z \Delta P_{jR} \cdot X_{j_{\text{ср}}}} \\ \beta_{\text{пер}} = h_{\text{ср}} \frac{\kappa \cdot M_{a_{\beta m}}^{\Gamma}}{\sum_{j=1}^z \Delta P_{j\text{ср}} \cdot X_{j_{\text{ср}}} - \sum_{j=1}^z \frac{\Delta P_{j\text{ср}} \cdot X_{j_{\text{ср}}}^2}{R_{\beta m} + X_{j_{\text{ср}}}}}$$

где $h_{\text{ср}}$ - длина лопатки;
 $\Delta P_{j_{\text{ср}}}$ - центробежная сила, определяемая по формуле (35);
 $X_{j_{\text{ср}}}$ - расстояние от корневого сечения до середины j -го участка;
 z - число участков;

$a_{\text{пер}}$ - координата центра тяжести периферийного сечения в осевом направлении;

$\beta_{\text{пер}}$ - координата центра тяжести периферийного сечения в окружном направлении.

$a_{\text{пер}}$ и $\beta_{\text{пер}}$ положительны, если они направлены в сторону положительных осей a и u соответственно.

3. Расчет на прочность

Определив $a_{\text{пер}}$ и $\beta_{\text{пер}}$, находим изгибающие моменты от центробежных сил и соответствующие им напряжения

$$M_{a_{\beta m}}^u = - \sum_{j=1}^z \Delta P_{jR} (\beta_{j_{\text{ср}}} - \beta_{\beta m}) + \sum_{j=1}^z \Delta P_{ju} \cdot X_{j_{\text{ср}}} \\ M_{u_{\beta m}}^u = \sum_{j=1}^z \Delta P_{jR} (a_{j_{\text{ср}}} - a_{\text{пер}})$$

где

$$P_{ju} = \frac{\gamma}{g} \omega^2 \cdot J_{icp} \cdot \Delta R_j \cdot \beta_{jcp} = \Delta P_{jR} \cdot \text{tg} \delta ;$$

$$\text{tg} \delta = \frac{\beta_{jcp}}{R_o + X_{jcp}} ; \quad X_{jcp} = R_{jcp} - R_o ;$$

$$\alpha_{jcp} = \alpha_{\text{пер}} \frac{X_{jcp}}{h} ; \quad \beta_{jcp} = \beta_{\text{пер}} \frac{X_{jcp}}{h} ; \quad \beta_m = 0 .$$

Относительно главных центральных осей:

$$M_x^u = M_{a\beta m}^u \cdot \sin \alpha - M_{u\beta m}^u \cdot \cos \alpha ,$$

$$M_y^u = M_{a\beta m}^u \cdot \cos \alpha + M_{u\beta m}^u \cdot \sin \alpha .$$

Здесь α - угол между осями X и a .

Напряжения изгиба от центробежных сил

$$\sigma_u^u = \frac{M_x^u \cdot e_1}{J_{\min}} + \frac{M_y^u \cdot e_2}{J_{\max}} ,$$

где e_1 и e_2 - расстояния от точки, в которой находятся напряжения, до осей X и Y соответственно.

Величина e_1 (e_2) считается положительной, когда точка, в которой определяется напряжение, лежит справа от оси X (Y), если смотреть из начала координат в положительном направлении.

Изгибающие моменты относительно главных центральных осей от сил давления газов:

$$M_x^r = M_{a\beta m}^r \cdot \sin \alpha - M_{u\beta m}^r \cdot \cos \alpha ,$$

$$M_y^r = M_{a\beta m}^r \cdot \cos \alpha + M_{u\beta m}^r \cdot \sin \alpha .$$

Напряжения изгиба от сил давления газов:

$$\sigma_u^r = \frac{M_x^r \cdot e_1}{J_{\min}} + \frac{M_y^r \cdot e_2}{J_{\max}} .$$

Находят $\sigma_{u\max}^u$ и $\sigma_{u\max}^r$ и считают суммарные напряжения, учитывая знаки напряжений

$$\sigma_{\text{сумм}} = \sigma_p + \sigma_{u\max}^u + \sigma_{u\max}^r .$$

Далее считают запас прочности

$$K = \frac{\sigma_{\text{ст}}}{\sigma_{\text{сумм}}} .$$

4. Проектирование корневого сечения.
Взаимное положение корневого, промежуточного
и периферийного сечений

После оценки площадей сечений и выносов приступаем к построению профиля корневого сечения. Построение ведется на отдельном листе в том же масштабе, что и сечение I-I.

Способ построения профиля корневого сечения в принципе ничем не отличается от способа построения профиля периферийного сечения, описанного ранее. Ширина решетки $S_{\beta m}$, хорда $\beta_{\beta m}$ корневого сечения оценены еще при выборе числа лопаток $z_{p.k}$.

Особенности корневого сечения:

а) угол β_{2k} , как правило, не удается выполнить равным углу $\beta_{2\text{эф}}$ (именно, $\beta_{2\text{эф}} < \beta_{2k}$) из-за необходимости иметь большую площадь $f_{\beta m}$;

б) так как $f_{\beta m} \gg f_{\text{пер}}$, то τ_1 и τ_2 должны быть так же соответственно увеличены;

в) максимальная толщина приблизительно определяется по (10); предварительно выбирается τ_2 , γ - по кривой I в приложении 4, β - по (II), τ_1 - по (6), далее L_p , \bar{X}_p , \bar{X}_{d_m} и, наконец, по (10) - d_m .

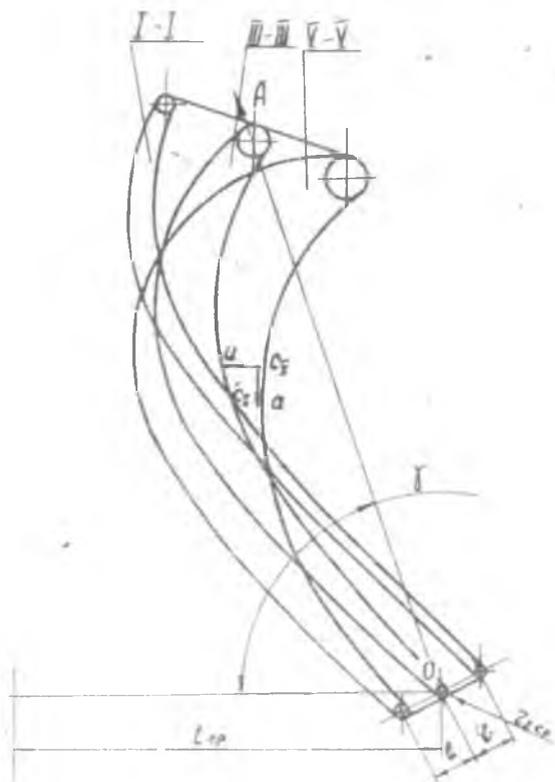
Пользуясь рекомендациями § 2 и § 4 главы I, строят корневое сечение, проверяют плавность изменения ширины канала, как описано в § 5.

Далее методом, описанным в § 6, определяют центр тяжести корневого сечения (вместе с тем проверяется соответствие площади построенного профиля потребной площади, определенной расчетом).

Совмещают изображение периферийного и корневого сечений следующим образом: в центре тяжести корневого сечения располагают систему координат $a-U$ (ось a - перпендикулярна фронту, ось U - параллельна ему), рис.29; откладывая $a_{\text{пер}}$ и $\beta_{\text{пер}}$, находят положение центра тяжести периферийного сечения в этой системе. Периферийное сечение совмещают с корневым так, чтобы центр тяжести его занял свое положение, а фронт решетки, составленной из профилей корневых сечений, был параллелен фронту решетки, составленной из профилей периферийных сечений. Соединив прямыми линиями

входные и выходные кромки корневого и периферийного сечений, получаем проекции кромок пера. Полученная картина дает примерное представление о виде всего пера; перо имеет конструктивный вид, а кромки могут быть обработаны широким инструментом по всей длине одновременно.

5. Проектирование промежуточных сечений



Наложив ограничения на форму проекций кромок, проектирование среднего сечения уже нельзя вести независимо от полученных очертаний пера.

При нечетном числе контрольных сечений после построения периферийного и корневого сечений рекомендуется построить среднее. Построение профиля среднего сечения целесообразно проводить на кальке, поместив под нее изображенные на ватмане конечные сечения.

Принимаем, что входная кромка лопатки прямолинейна. Тогда, разделив пополам расстояние между центрами окружностей выходных

Рис. 29.

кромки концевых сечений, получаем положение центра окружности выходной кромки среднего сечения, рис.29. За величину Z_{2cp} принимаем полусумму значений выходных радиусов концевых сечений.

Имея выходную кромку, ведем, как обычно, построение профиля, выдерживая угол $\beta_{23ф}$ и требования к углу δ . Углы ω_1 и ω_2 определяем следующим образом. Зная $\beta_{1к}$ и $\beta_{2к}$, по графику в приложении 4 находим угол установки γ . Далее определяем хорду b , расположив для первой прикидки входную кромку на пересечении луча OA (рис.29), проведенного под углом γ , с проекцией входной кромки. По графику в приложении 2 находим \bar{X}_{d_m} , далее по (9) - L_p и по (10) - d_m . Теперь по (12) и (13) определяем ω_1 и ω_2 .

Положение входной кромки накладывает ограничение на ширину решетки и, следовательно, на относительный шаг t/b . Если t/b лежит в пределах $(0,9+1,15) \cdot (t/b)_{opt}^{*})$, то величину хорды исправлять не следует. Если $\frac{t}{b} > 1,15 \bar{t}_{opt}$, то можно отказаться от простых форм кромок и тем самым увеличить хорду. При этом последовательно пользуются следующими приемами:

а) пусть проекции выходных, а также входных кромок касаются одной прямой. Перемещая проекцию выходной кромки среднего сечения к корневому в пределах проекции шага между контрольными сечениями $\bar{t}_{к.с.}$ (рис.30), увеличивает хорду профиля среднего сечения; так оставляя неизменным угол " γ " можно увеличить b_{cp} из-за непараллельности проекций входной и выходной кромок. Если таким способом не удастся получить $\frac{t}{b} \approx 1,15 \left(\frac{t}{b}\right)_{opt}$, применяют следующий прием;

б) в направлении луча OA (рис.29), проведенного под углом γ , переносят центр входной кромки на величину Δ :

$$\Delta = b_{нов} - b$$

$$b_{нов} = \frac{t}{\bar{t}_{opt}}$$

Возможно сочетание обоих приемов, но всегда следует стремиться к наиболее простым формам кромок.

Далее с помощью лекала проводят кривую, касательную к входным

* По данным работы [22] при отклонении относительного шага от оптимального в пределах $+15 + -10$ % к.п.д. решетки уменьшается на 1 %, что принимается допустимым.

кромкам. Получают первое приближение проекции контура входной кромки.

Получив вариант профиля среднего сечения, определяют положение его центра тяжести. Если оно не соответствует расчетному (лежит ниже или выше расчетного), то можно изменить радиус входной кромки, изменяя при этом лишь контур корыта (спинки) или же контуры корыта и спинки одновременно.

Если центр тяжести лежит правее (левее) расчетного, то можно сместить профиль вправо (влево) вдоль прямой линии, соединяющей выходные кромки, отказавшись при этом от прямолинейности кромки.

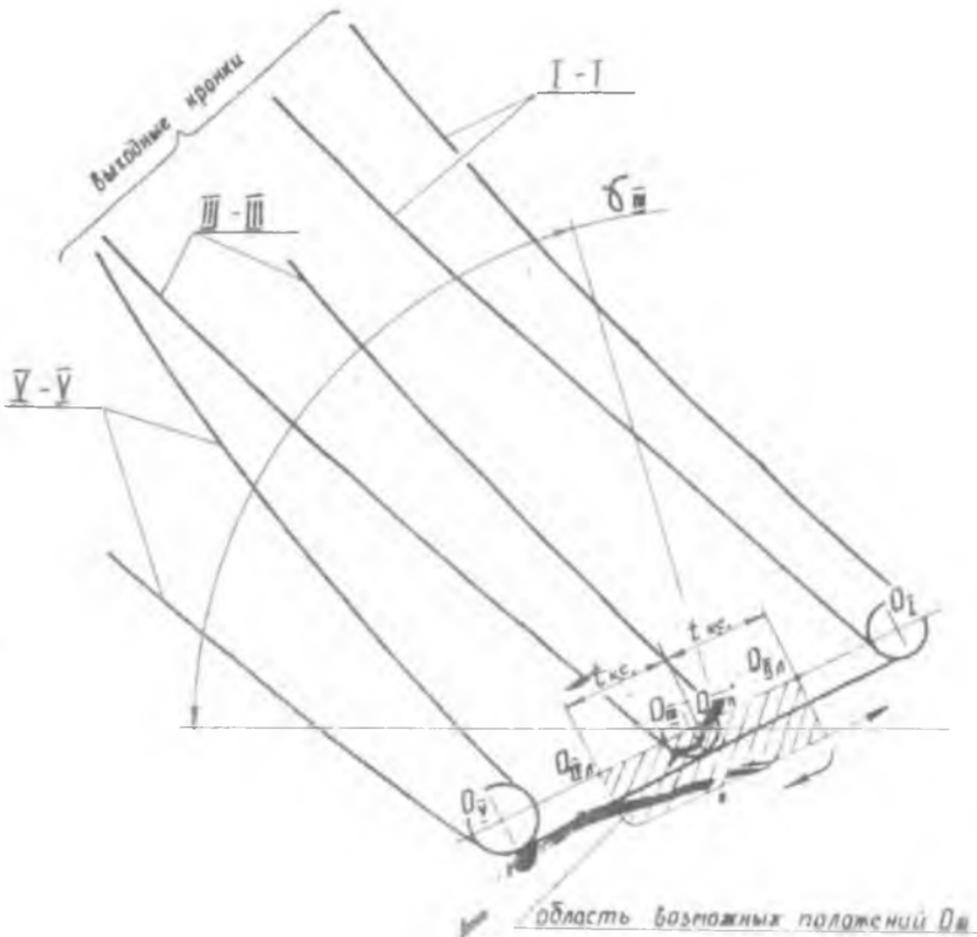


Рис. 30.

При всех этих вариациях следует контролировать площадь сечения. Получив окончательно средний профиль, переносят его на ватман, где изображены остальные два (рис.31).

Теперь строим остальные промежуточные сечения. Для этого проектируем центры окружностей входных (и выходных) кромок на плоскости P и Q , проходящие через центры окружностей входных и выходных кромок корневых и периферийного сечений. По полученным проекциям центров кромок, строим первое приближение кривых распределения центров этих кромок по длине лопатки (рис.32).

Затем рассекаем лопатку рядом плоскостей, параллельных радиусу рабочего колеса. Положение плоскостей можно выбирать произвольно, но стремиться к тому, чтобы в плоскости, рассекающей лопатку, получить представление о действительном изменении толщины лопатки по длине. Рекомендуется рассекать лопатку группами параллельных плоскостей, причем одна из линий в группе приблизительно нормальна скелетной линии профиля среднего сечения (рис.33).

Таким образом, в секущих плоскостях получаем шесть точек (по две от каждого построенного профиля), через которые с помощью лекала проводим плавные линии. Получаем первое приближение сечений будущей лопатки.

Сечения лопатки плоскостями, параллельными радиусу рабочего колеса, должны быть фигурами, ограниченными плавными кривы-

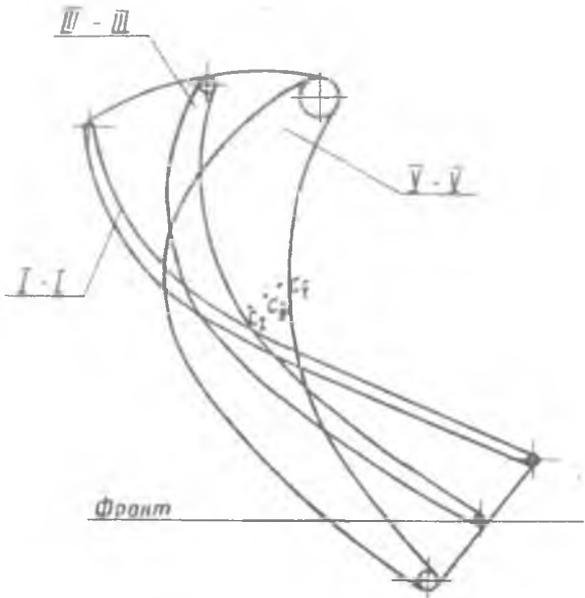


Рис. 31.

ми, причем радиус кривизны этих кривых может изменять свой знак не более одного раза на всей длине лопатки.

У профилей промежуточных сечений, которые нужно еще построить, оценим значения хорд методом, показанным на рис.32 для сечения П-П, проверяем относительный шаг ($\bar{\tau}$); в случае несоответствия их требуемым значениям, корректируем эти величины приемами, применявшимися для среднего сечения. При этом следим за тем, чтобы кривые распределения центров входных и выходных кромок по длине лопатки были плавными и не имели точек перегиба.

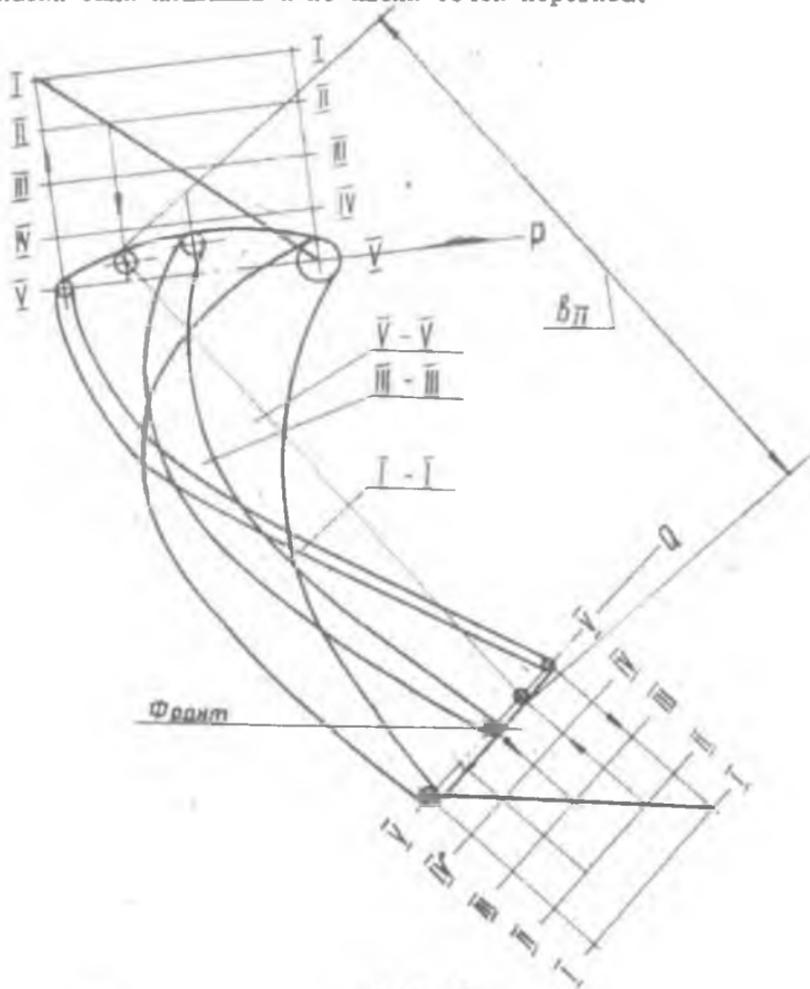


Рис. 32.

По точкам, полученным в плоскостях: $I, 2 \dots n$, строим профили промежуточных сечений. Методом, описанным в § 6, определяем площади промежуточных сечений и положение их центров тяжести.

Корректируем профили промежуточных сечений, выдерживая углы $\beta_{2ЭФ}$, δ и площадь. Центр тяжести стремимся привести в расчетную точку, для чего изменяем величину и положение максимальной

1-1

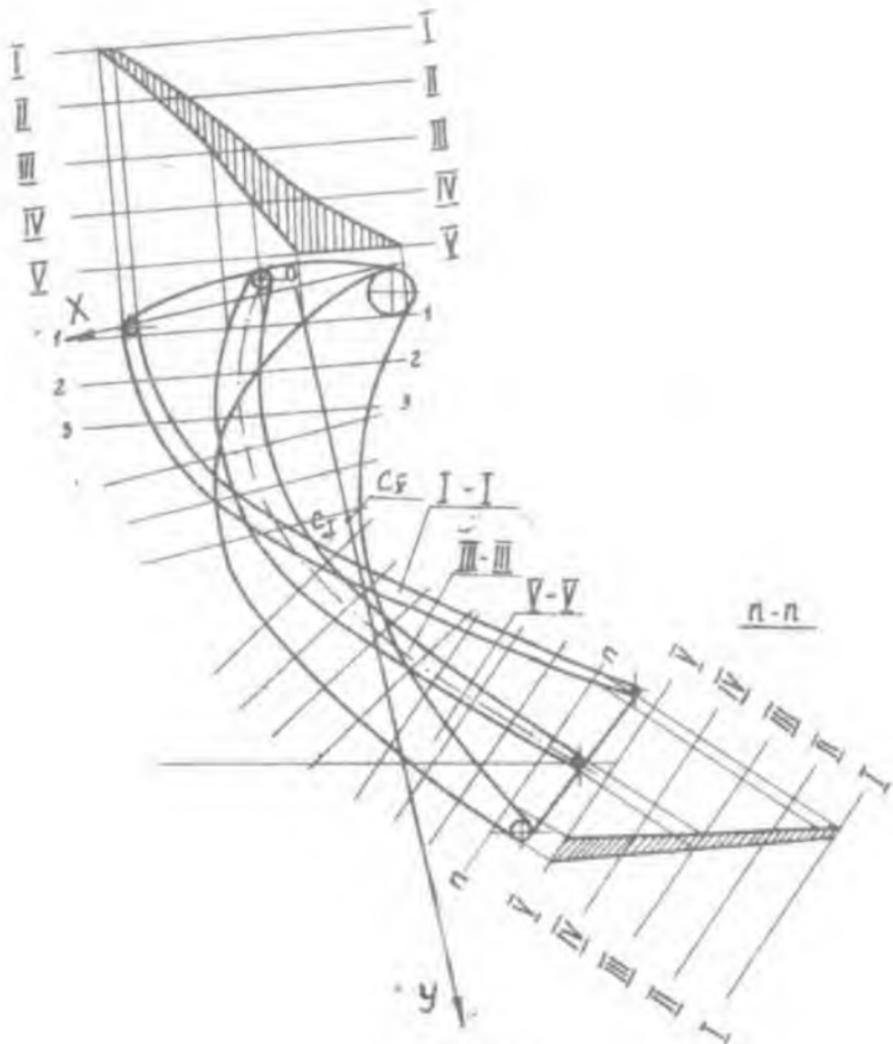


Рис. 33.

толщины и входной кромки. При этом следует держать \bar{t} в пределах $(0,9+I,15)\bar{t}_{opt}$ и следить за плавностью кривой распределения центров входных кромок по длине лопатки.

Таким образом получают все необходимые контрольные сечения.

При графическом изображении кривых распределения центров входных и выходных кромок радиусы кромок, проекции расстояний между ними, а также толщины сечений целесообразно выполнять в масштабе 10:1 (20:1), а расстояние между контрольными сечениями - в натуральную величину или в масштабе 2:1, 5:1. При этом кривые и фигуры сечений имеют утрированный вид, но он более нагляден.

Лопатку, спроектированную рассмотренным методом, можно с высокой точностью и высокопроизводительно изготовлять точным литьем и электрохимической обработкой. Такие методы экономически оправдывают себя при серийном производстве. В опытно-производстве целесообразнее получить лопатки из заготовок путем механической обработки. Чтобы перо лопатки можно было высокопроизводительно и с большой точностью обрабатывать механическим путем, необходимо, чтобы поверхности лопатки были технологичными. Однако при профилировании рассмотренными методами чаще всего получаются нетехнологические поверхности.

Существуют методы проектирования пера лопаток, которые дают возможность высокопроизводительно и с большой точностью обрабатывать лопатку механическим путем; при этом выбирается технологичная поверхность пера. В § 14 рассматривается один из таких методов.

6. Координирование профилей лопатки

Какими бы кривыми не были образованы контуры корыта и спинки профилей, общепринятым методом задания профиля в чертеже лопатки является задание координат ряда его точек.

Обычно выбирается единая система координат XOY для всех профилей, изображенных совмещенными в одной проекции (рис.33). На этом рисунке показано весьма распространенное положение системы.

Ось абсцисс проходит через центр тяжести корневого сечения параллельно плоскости симметрии замка лопатки. (Такой выбор связан с методом контроля профилей с помощью шаблонов спинки и корыта.) Так как плоскость симметрии замка обычно составляет малый угол с хордой профиля корневого сечения, то ось OX можно направить параллельно этой хорде. Ось ординат касается входной кромки корневого сечения.

В системе XOY выбирается шаг по оси абсцисс, обычно равномерный с интервалом $1-3$ мм. Желательно, чтобы точек на контуре профиля было не менее $10-15$, так что чем больше хорда профиля, тем большим может быть принят интервал разбивки.

Измеренные значения ординат, прежде чем их поместить в таблицу чертежа, должны быть проверены на плавность кривой. Метод такой проверки изложен в § 15.

В чертеже обычно оговаривается требование на изготовление участков профиля, расположенных между закоординированными точками, - между точками должен быть обеспечен плавный переход. Допустимые отклонения линии профиля от номинального положения составляют $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,15$ мм в зависимости от габаритов лопатки.

§ 14. Профилирование с применением технологичных поверхностей пера

К рабочим лопаткам турбины предъявляются требования в отношении величины площади и положения центра тяжести сечений по высоте пера. Это обстоятельство, а также ряд аэродинамических требований определяют характер кривых, образующих контуры сечений. Поэтому не удается спрофилировать рабочую лопатку с цилиндрическими поверхностями по корыту и спинке, не поступаясь к.п.д. Известны лопатки турбины, например, рабочая лопатка турбины двигателя ВК-1, поверхность корыта которых представляет собой круглый цилиндр, сопряженный с плоскостью. Некруглые цилиндры применяются на рабочих лопатках паровых и газовых неавиационных турбин для образования поверхностей только корыта.

Но такая конструкция лопатки часто не удовлетворяет аэродинамическим требованиям. Поэтому, желая сохранить технологичность

корыта, применяют поверхности, получаемые обкаткой тела вращения по контуру одного профиля. В большинстве же случаев профилирование ведется по отдельным сечениям. При этом для участков пера, расположенных между контрольными сечениями, ставится довольно нечеткое требование соблюдения плавного перехода от одного сечения к другому.

Оригинальным и эффективным способом создания единой поверхности, связывающей контуры сечений пера, удовлетворяющей конструктивным требованиям и в то же время поддающейся обработке широким инструментом, является обкатка круглого цилиндра по контурам двух сечений, спрофилированных независимо друг от друга. Используемые при этом приемы профилирования лопаток определяются самим методом обработки поверхностей, образовавшихся при такой обкатке. Сущность его заключается в следующем. Цилиндрическая фреза устанавливается вдоль пера и обрабатывает его одновременно по всей длине от входной кромки к выходной (рис.34).

Движение от фрезы определяется контурами двух крайних сечений I-I и V-V. Пересечение каждой из плоскостей, в которых лежат эти сечения, с цилиндрической поверхностью фрезы дает в общем случае эллипс. Последний при дальнейших рассуждениях можно без большой погрешности заменить окружностями K_I и K_V .

При указанной подаче фреза должна перемещаться так, чтобы обе окружности (K_I и K_V) непрерывно обкатывались по соответствующим исходным профилям. Центры этих окружностей описывают траектории M_I и M_V , которые проходят эквидистантно исходным профилям корыта сечений I-I и V-V на расстоянии радиуса фрезы. Профили, расположенные между сечениями I-I и V-V, при таком методе получают автоматически. Ось фрезы, перемещаясь от одного своего положения к другому, кроме основной подачи, совершает еще два движения: а) вверх и вниз в соответствии с формой контуров и б) качение из-за их различия (практически эти движения осуществляются не осью фрезы, а лопаткой посредством приспособления с качающейся лыской или столом станка (рис.35).

Фрезерование с помощью этого приспособления выполняется на обычных универсально-фрезерных станках; при этом обеспечивается стабильная обработка, небольшой разброс размеров между лопатками одной серии (не более 0,1 мм) и чистота поверхности выше пес-

* Разработан с участием ф.Бредендик [18]

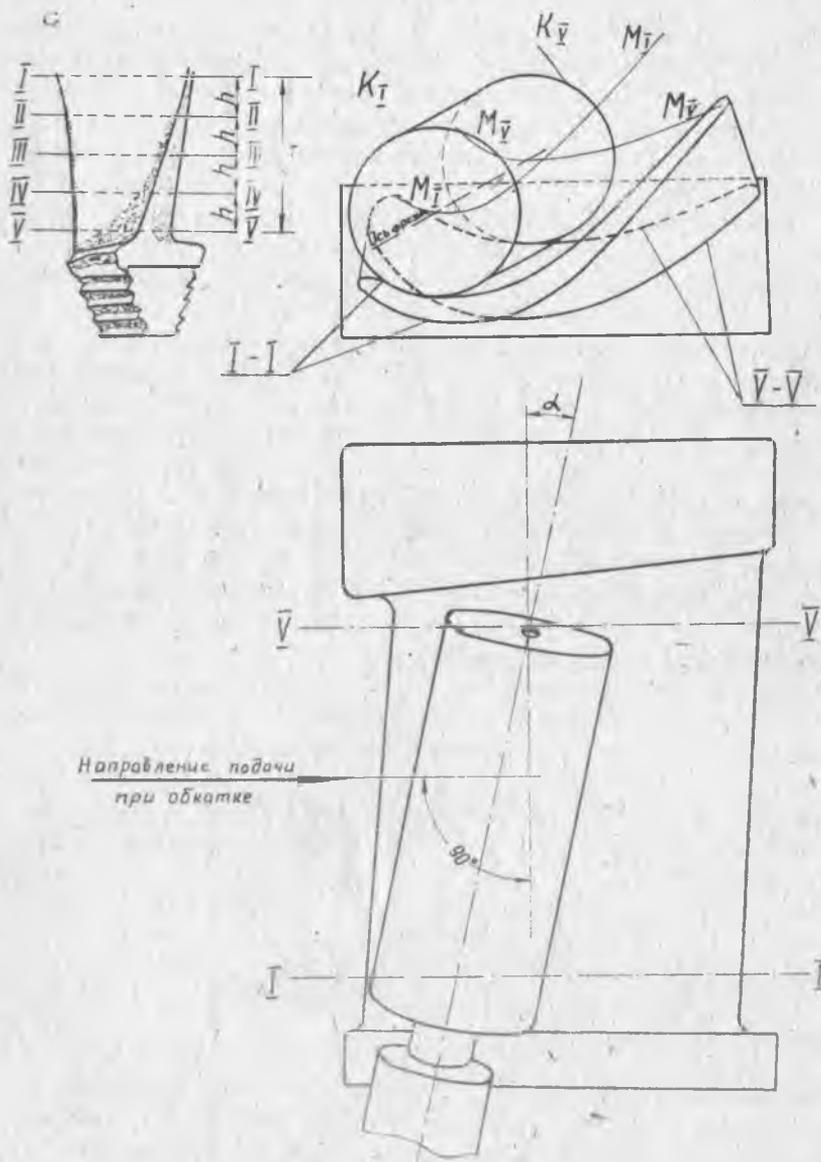


Рис. 34.

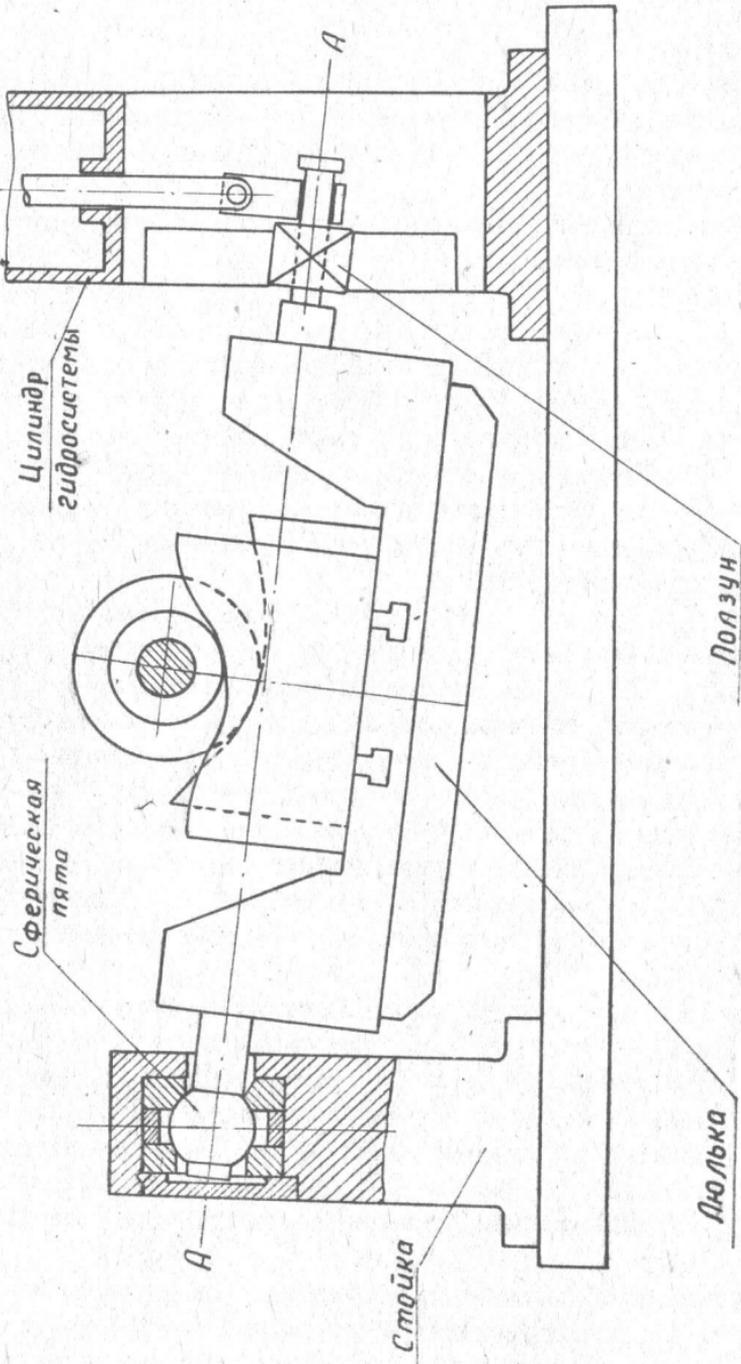


Рис. 35.

того класса.

Рассмотрим приемы профилирования на примере рабочих лопаток турбины, корыто которых образовано обкаткой цилиндра. При таком методе необходимо, чтобы в этих лопатках радиус кривизны корыта не был слишком мал.

Вначале определяют профили I-I и V-V, исходя из требований аэродинамики и прочности.

Профили (рис.36) строят в масштабе 10:1. Вычертив профили I-I и V-V, по наименьшему радиусу их кривизны выбирают радиус фрезы. Он должен составлять примерно $\frac{2}{3}$ минимального радиуса кривизны, так как фрезам больших диаметров режут плохо, из-за слишком значительной длины дуги резания, а фрезы меньших диаметров, как правило, оказываются недостаточно прочными. Затем на расстоянии радиуса фрезы прочерчивают эквидистанты к исходным профилям, получая тем самым траектории M_I и M_V соответствующих точек оси фрезы.

Выбрав размер "S", определяющий наклон фрезы или угол поворота стола станка " α " ($\alpha = \arctg \frac{S}{L_1}$, L_1 см. рис.34), проводят прямую $M'_I M'_V$. Эта прямая является проекцией отрезка оси фрезы, заключенного между соответствующими эквидистантами, в какой-то момент обкатки. Так как в данном случае сечение III-III расположено на середине расстояния между сечениями I-I и V-V, то, разделив пополам отрезок $M'_I M'_V$, получают центр сечения фрезы, воспроизводящего контур корыта профиля III-III. Таким же образом находят другие точки, лежащие на траектории M_{III} . Эквидистанта к ней на расстоянии радиуса фрезы представляет собой контур корыта профиля III-III.

Аналогично строят контуры корыт других промежуточных сечений (II-II, IV-IV), расстояния между которыми для удобства проектирования берут равными (см. рис.34, размер "h").

К полученным контурам корыта достраивают спинки. Как правило, первая прикидка оказывается неудачной в отношении центров тяжести или углов входа и выхода этих сечений. Тогда, оставляя неизменными исходные профили, заменяют промежуточные, используя следующие приемы:

I. Вследствие различия исходных контуров и наклонаго положения фрезы последние начинают обрабатывать профиль V-V тогда, когда входная часть профиля I-I уже обработана. Ось фрезы в момент

начала обработки профиля V-V расположена на прямой $M_I^* M_V^*$. Движение фрезы влево от положения, соответствующего этому моменту, никак не влияет на профиль V-V. Поэтому траекторию M_V можно продлить на входе иначе, чем в первый раз. Соответственно скорректируется входная часть профиля Ш-Ш. Новая входная часть корита (рис.36, вариант А) позволяет уменьшить угол входа этого сечения на величину $\Delta\beta_{IK}$. Аналогично можно изменить и выходную часть промежуточных профилей.

2. Варьируя размер "S", т.е. подбирая наклон фрезы (рис.37, вариант Б и В), изменяют положение центров тяжести промежуточных сечений.

3. Перемещая лопатку в приспособлении с лямкой (рис.38, варианты Г и Д) при $s = const$, т.е. увеличивая или уменьшая угол β , изменяют одновременно углы входа, выхода и положение центра тяжести.

Эффективность использования каждого из указанных приемов для изменения промежуточных профилей зависит от профилей I-I и V-V. Итак, промежуточные профили могут быть различными при неизменных исходных профилях.

Благодаря этой ценной особенности, описанный метод может применяться для профилирования рабочих лопаток турбины, различных по аэродинамическим нагрузкам, степени реактивности, относительной длине, закрутке, а также распределению по высоте пера площади и центров тяжести сечений и другим требованиям. Спинки всех этих лопаток выполняется без специального учета метода механической обработки и практически изготавливаются построчным фрезерованием на станках типа МК-56 и МК-54. Окончательную форму спинки получают шлифованием широким кругом по всей длине пера на станках ХШ-65 или шлифованием широкой абразивной лентой на станках ХШ-185.

§ 15. Аналитический метод проверки плавности контуров профилей

Профиль пера в чертеже задается в виде таблицы координат точек контура. Приняв по оси абсцисс интервал разбивки, снимают его контура, изображенного в крупном масштабе, соответствующие значения ординат. Прежде чем эти значения поместить в чертёж, их

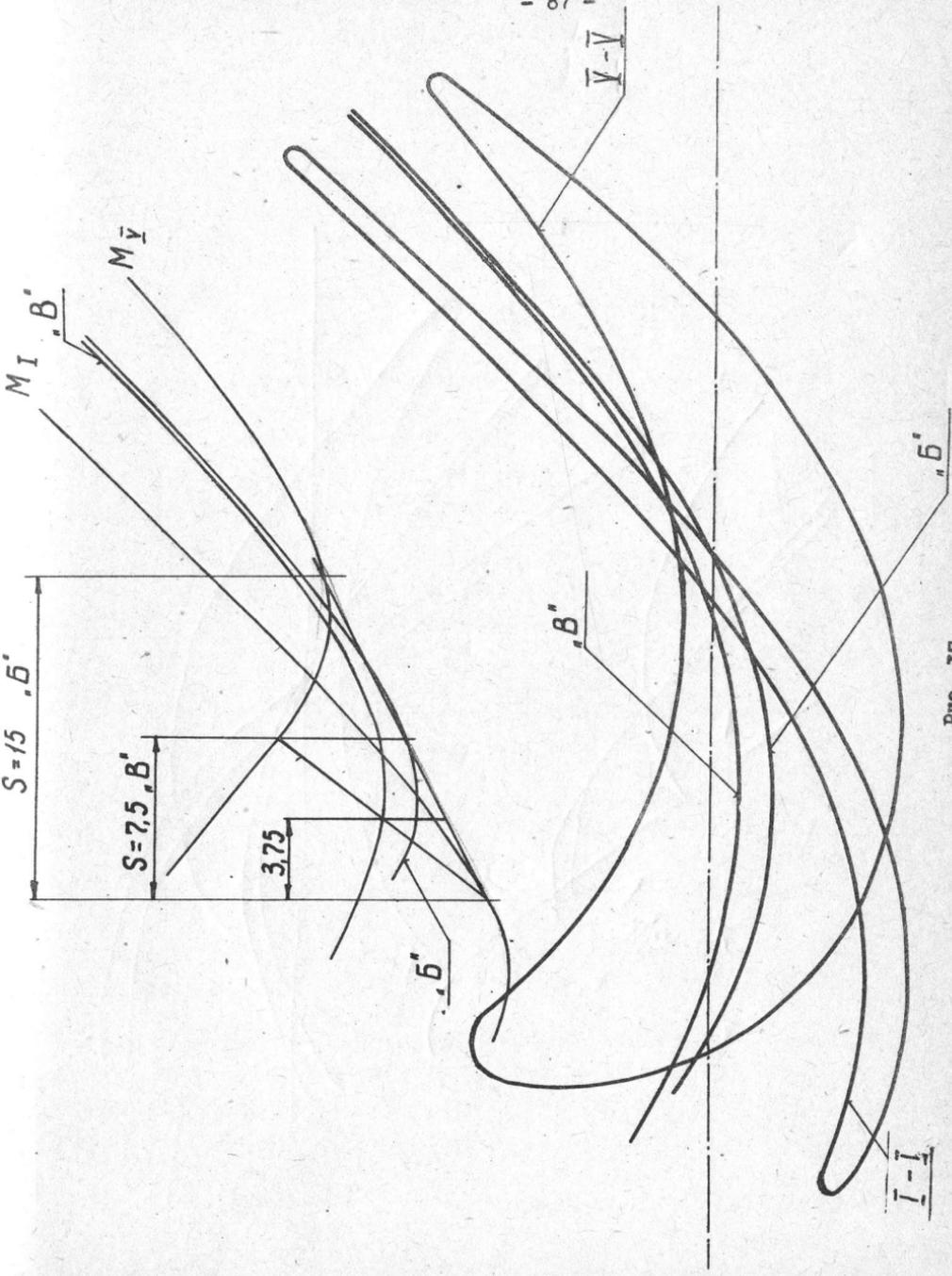


Рис. 37.

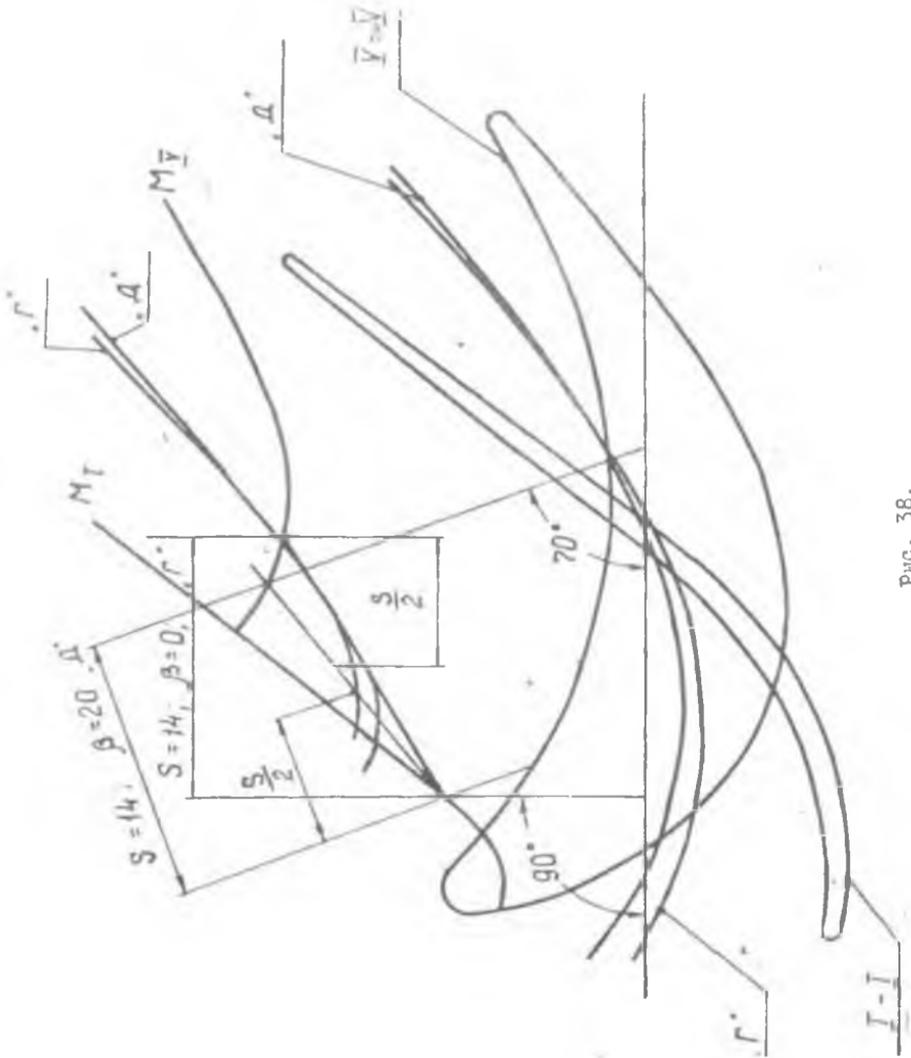


Рис. 38.

необходимо проверить указанным ниже методом на плавность контура профиля.

Излагаемый ниже метод позволяет объективно судить о плавности кривой и при необходимости сделать поправки к снятым значениям ординат. Метод проверки плавности контура профиля основан на исчислении конечных разностей.

I. Разности и плавность кривой^{ж)}

Пусть дан ряд ординат в равномерной по оси X разбивке:

$$Y_{n-4}, Y_{n-3}, Y_{n-2}, \dots, Y_{n+3}, Y_{n+4} \quad .$$

В теории конечных разностей принят следующий порядок составления разностей. Из последующей ординаты вычитается предыдущая (как в дифференциальном исчислении). Эти разности называются разностями первого порядка. Будем обозначать их через Δ с индексом внизу, равным полусумме индексов уменьшаемого и вычитаемого, и записывать против промежутков между уменьшаемым и вычитаемым.

Из разностей первого порядка таким же способом составляются разности второго порядка. Будем обозначать их через Δ^2 с индексом внизу, равным полусумме индексов уменьшаемого и вычитаемого.

Аналогично составляются разности третьего, четвертого и (если нужно) более высоких порядков. Практически для наших целей разностями выше четвертого порядка пользоваться не приходится.

В таблице I приведена схема вычисления разностей.

Чтобы яснее понять сущность проверки плавности кривых с помощью разностей, необходимо знать геометрический смысл разностей первого и второго порядков.

Разность первого порядка равна превышению последующей точки над предыдущей. Если последующая точка расположена выше предыдущей, то $\Delta > 0$, если ниже, то $\Delta < 0$.

Разность второго порядка равна удвоенной вертикальной стреле прогиба на участке, равном двум пролетам разбивки (по одному пролету с каждой стороны от рассматриваемой точки). Сделаем это.

^{ж)} Изложение дается с сокращениями из [23].

Т а б л и ц а I

Схема вычисления разностей и расположение их

Дистанция	Исходная ордината	Разности порядков				
		первого	второго	третьего	четвертого	пятого
		Δ^1 например, $\Delta_{n-3,5} = y_{n-3} - y_{n-4}$	Δ^2 например, $\Delta_{n-3}^2 = \Delta_{n-3,5} - \Delta_{n-4,5}$	Δ^3 например, $\Delta_{n-2,5}^3 = \Delta_{n-2,5}^2 - \Delta_{n-3,5}^2$	Δ^4 например, $\Delta_{n-2}^4 = \Delta_{n-2,5}^3 - \Delta_{n-3,5}^3$	Δ^5 например, $\Delta_{n-1,5}^5 = \Delta_{n-1,5}^4 - \Delta_{n-2,5}^4$
X_{n-4}	y_{n-4}					
X_{n-3}	y_{n-3}	$\Delta_{n-3,5}$	Δ_{n-3}^2	$\Delta_{n-2,5}^3$		
X_{n-2}	y_{n-2}	$\Delta_{n-2,5}$	Δ_{n-2}^2	$\Delta_{n-1,5}^3$	Δ_{n-2}^4	
X_{n-1}	y_{n-1}	$\Delta_{n-1,5}$	Δ_{n-1}^2	$\Delta_{n-0,5}^3$	Δ_{n-1}^4	$\Delta_{n-1,5}^5$
X_n	y_n	$\Delta_{n+0,5}$	Δ_n^2	$\Delta_{n+0,5}^3$	Δ_n^4	$\Delta_{n+0,5}^5$
X_{n+1}	y_{n+1}	$\Delta_{n+0,5}$	Δ_{n+1}^2	$\Delta_{n+1,5}^3$	Δ_{n+1}^4	$\Delta_{n+0,5}^5$
X_{n+2}	y_{n+2}	$\Delta_{n+1,5}$	Δ_{n+2}^2	$\Delta_{n+1,5}^3$	Δ_{n+1}^4	$\Delta_{n+1,5}^5$
X_{n+3}	y_{n+3}	$\Delta_{n+2,5}$	Δ_{n+3}^2			
X_{n+4}	y_{n+4}	$\Delta_{n+3,5}$				

Пусть имеем на некоторой кривой три точки (рис.39):

$$M_{n-1}; M_n \text{ и } M_{n+1}$$

Проведем через точки M_{n-1} и M_n горизонтали $M_{n-1}S$ и M_nQ , вертикали M_nS и $M_{n+1}Q$ и секущие $M_{n-1}M_{n+1}$ и $M_{n-1}M_n$; последнюю секущую продолжим до пересечения в точке P с вертикалью, проведенной через точку M_{n+1} ; тогда

$$QM_{n+1} = \Delta_{n+0,5},$$

$$QP = SM_n = \Delta_{n-0,5},$$

$$PM_{n+1} = QM_{n+1} - QP = \Delta_{n+0,5} - \Delta_{n-0,5} = \Delta_n^2,$$

но

$$PM_{n+1} = 2M_n R,$$

или

$$\Delta_n^2 = 2f_{n\text{верт}}.$$

Надо помнить, что цифра 2 здесь не показатель степени, а индекс порядка разности. Очевидно, что если кривая обращена выпуклостью вниз, то $\Delta_{n+0.5} > \Delta_{n-0.5}$ и, следовательно, $\Delta_n^2 > 0$. Если кривая обращена выпуклостью вверх, то $\Delta_{n+0.5} < \Delta_{n-0.5}$ и, следовательно, $\Delta_n^2 < 0$.

Здесь есть аналогия с дифференциальным исчислением, где если кривая обращена выпуклостью вниз, то $\frac{d^2y}{dX^2} > 0$, если кривая обращена выпуклостью вверх, то $\frac{d^2y}{dX^2} < 0$.

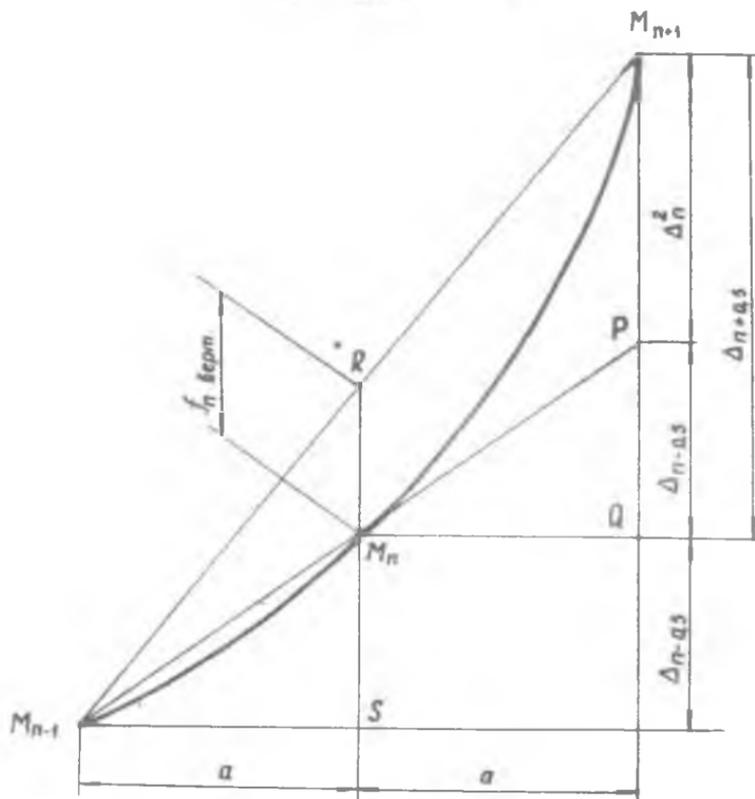


Рис. 39.

Из геометрического смысла разностей первого и второго порядков ясно, что у плавной кривой они должны изменяться монотонно, т.е. в одном направлении, увеличиваясь или уменьшаясь.

Изменение разностей первого и второго порядков отражает изменение соответственно первой и второй производной (а следовательно, и кривизны). Выпадение разности второго порядка указывает на местное увеличение или уменьшение кривизны.

Разберем ряд примеров.

Кривые задаем ординатами, приведенными в таблицах 2,3,4. Определить, будут ли они плавными.

Таблица 2

№ точки	Y
1	125,3
2	164,5
3	157,6
4	172,4
5	165,6

Таблица 3

точки	Y	Δ
1	25,3	
2	36,4	11,1
3	41,7	5,3
4	49,6	7,9
5	53,7	4,1
6	60,1	6,4

При беглом взгляде на числовые значения ординат в таблице 2 легко убедиться в неплавности кривой.

В таблице 3 непосредственно по ординатам нарушений плавности еще не заметно, но по разностям первого порядка волнообразность кривой уже очевидна: превышение последующей точки над предыдущей то уменьшается, то увеличивается. Из таблицы 4 можно установить, что по разностям первого порядка нарушений плавности еще не видно, но разности второго порядка указывают на выпадение точки 5 вниз (кривая обрамлена выуклостью вниз и вертикальная стрела прогиба в точке 5 слишком велика).

Заметим, что выпадение точки значительно меньше, чем это может показаться по разностям. Чтобы устранить это нарушение плавности, достаточно ординату точки 5 увеличить на 1,5 (табл.5). Теперь по разностям второго порядка нарушений плавности не заметно.

Однако у плавной кривой кривизны, а следовательно, и разность второго порядка должны изменяться не только монотонно, но и плавно.

Таблица 4

№ точки :	У :	Δ :	Δ ² :
1 :	36,6 :	:	:
2 :	56,2 :	19,6 :	18,2 :
3 :	94,0 :	37,8 :	15,3 :
4 :	147,1 :	53,1 :	12,7 :
5 :	212,9 :	65,8 :	15,5 :
6 :	294,2 :	81,3 :	8,7 :
7 :	384,2 :	90,0 :	7,8 :
8 :	482,0 :	97,8 :	:

Чтобы проверить характер изменения разности второго порядка, надо поступить с этими разностями так же, как с исходными ординатами, т.е. составить из них разности первого и второго порядков. По отношению к исходным ординатам это будут уже разности третьего и четвертого порядков.

Как видно из таблицы 5, разности третьего порядка указывают на нарушение плавности. Оно менее значительно

и устраняется поправкой +0,5 на вторую ординату. После внесения этой поправки разность третьего порядка изменяется уже монотонно (таблица 6).

Таблица 5

№ гоч+ км :	У :	Δ :	Δ ² :	Δ ³ :
1 :	36,6 :	:	:	:
2 :	56,2 :	19,6 :	18,2 :	:
3 :	94,0 :	37,8 :	15,3 :	-2,9 :
4 :	147,0 :	53,1 :	14,2 :	-1,1 :
5 :	214,4 :	67,3 :	12,5 :	-1,7 :
6 :	294,2 :	79,8 :	10,2 :	-2,3 :
7 :	384,2 :	90,0 :	7,8 :	-2,4 :
8 :	482,0 :	97,8 :	:	:

Таблица 6

№ гоч+ км :	У :	Δ :	Δ ² :	Δ ³ :	Δ ⁴ :
1 :	36,6 :	:	:	:	:
2 :	56,7 :	20,1 :	17,2 :	:	:
3 :	94,0 :	37,3 :	15,8 :	-1,4 :	-0,2 :
4 :	147,1 :	53,1 :	14,2 :	-1,6 :	-0,1 :
5 :	214,4 :	67,3 :	12,5 :	-1,7 :	-0,6 :
6 :	294,2 :	79,8 :	10,2 :	-2,3 :	-0,1 :
7 :	384,2 :	90,0 :	7,8 :	-2,4 :	:
8 :	482,0 :	97,8 :	:	:	:

Разности четвертого порядка теоретически показывают некоторое нарушение плавности, однако оно уже настолько мало, что практически незаметно. Поэтому на практике ограничивается разностью

четвертого порядка.

2. Влияние изменения одной ординаты на разности

Из приведенных выше примеров ясен способ обнаружения неплavностей, но еще неясно, как их устранять и как определять поправки на ординаты. Для этой цели необходимо знать, как влияет изменение одной ординаты на разности различных порядков. Это легко выяснить, приняв одну ординату Y_n равной h , а все остальные равными нулю. В самом деле, величина изменений разностей не зависит от величины ординат. Если бы все ординаты были равны нулю, то и разности были бы равны нулю. Если же ордината $Y_n = h$, а все остальные ординаты равны нулю, то разности будут равны искомым изменениям разностей при любых значениях ординат.

Таблицу этих изменений (табл.7) назовем схемой влияния изменения одной ординаты на разности. Эта таблица дана до Δ^4 включительно, но ее легко и продолжить.

Таблица 7

Характерный признак ординаты	Исходная ордината	Приращения разностей			
		Δ	Δ^2	Δ^3	Δ^4
$n-4$	0				
$n-3$	0				
$n-2$	0				
$n-1$	0			$-h$	$-4h$
n	h	$-h$	$-2h$	$3h$	$6h$
$n+1$	0	$-h$	$-h$	$-h$	$-4h$
$n+2$	0				
$n+3$	0				
$n+4$	0				

Следует запомнить закон образования этой таблицы.

I. Зона влияния приращения одной ординаты на разности ограничивается двумя диагональными рядами (проходящими через эту орди-

нату). В каждом столбце число разностей, на которые окажет влияние приращение ординаты, на единицу больше порядка этих разностей.

2. Приращение разностей m -го порядка по абсолютной величине равны биномиальным коэффициентам бинома в степени m , умноженным на приращение ординаты h . Знаки приращений разностей чередуются. Приращение верхней разности имеет знак плюс.

3. В восходящем диагональном ряду приращения всех разностей равны приращению ординаты h .

В нисходящем диагональном ряду приращение разностей четных порядков равны h , разностей нечетных порядков равны $-h$.

4. Максимальные по абсолютной величине приращения имеют место у каждой разности четного порядка, расположенной в таблице против измененной ординаты, и у каждой пары разностей нечетного порядка, расположенных против промежутков около измененной ординаты.

Это позволяет сделать следующее заключение. Судить о том, какая именно точка выпадает, в какую сторону и насколько, удобней по разностям четных порядков. А так как разностями выше четвертого порядка пользоваться почти не приходится, то плавность проверяют по разностям только второго и четвертого порядков. Очень часто проверка плавности по разностям второго порядка дает уже вполне удовлетворительные результаты.

Г л а в а IУ

ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРА ЛОПАТОК

§ 16. Примеры профилирования сопловых лопаток

Пример I. Спрофилировать сопловую лопатку первой ступени турбины, рассчитанной по методике [21].

В расчете по многим сечениям был выбран закон закрутки потока в сопловом аппарате:

$$\alpha_1 = \text{const}.$$

Были также определены геометрические размеры соплового аппарата (рис.40) и параметры потока по высоте канала:

$\alpha_0 = 90^\circ,$	$G = 16,77 \text{ кг/сек},$
$\rho_0 = 7,6 \text{ кг/см}^2,$	$c_1 = f(R),$
$c_{a_0} = c_0 = 110 \text{ м/сек},$	$\rho_1 = f(R),$
$c_{u_0} = 0,$	$\alpha_1 = 17^\circ 35',$
$\varphi = 0,964,$	$P_{1cp} = 5,09 \text{ кг/см}^2,$
$T_0^* = 1000^\circ \text{К},$	$c_{a1cp} = 132 \text{ м/сек},$
$F_0 = 0,0587 \text{ м}^2,$	$c_{u1cp} = 447 \text{ м/сек}.$

I. Подготовка к профилированию

Оценим значение угла $\alpha_{0к}$. В соответствии с рекомендацией методики (гл. I, § 2) принимаем $\alpha_{0к} = 90^\circ - 2^\circ = 88^\circ = \text{const}$.

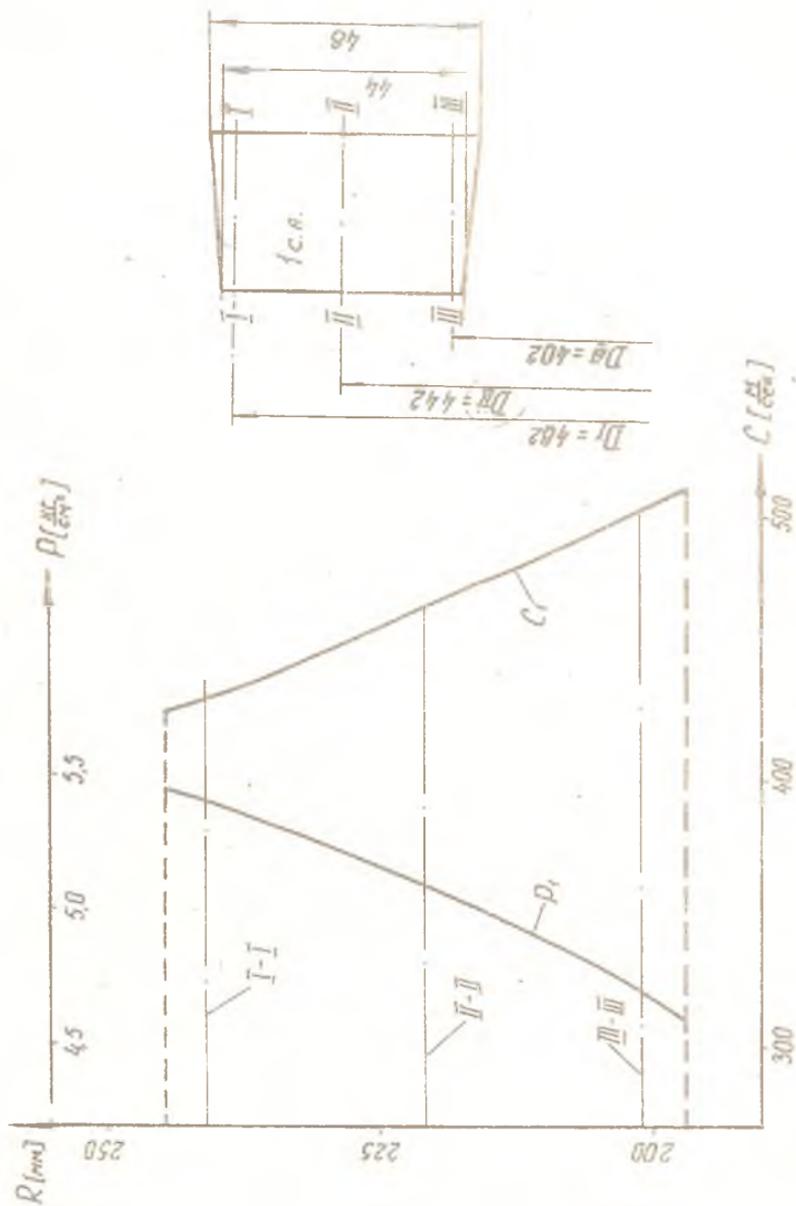


Рис. 40.

Для нахождения $\alpha_{1зф}$ используем кривые "Данные по девиации потока на выходе из решетки" (приложение I). Предварительно находим $\lambda_{1ад}$ для контрольных сечений, которые выбираем, используя рекомендации настоящей методики (стр.44):

I-I на радиусе $R_{пер} = 24I$ ($D_I = 482$),

II-II на радиусе $R_{ср} = 22I$ ($D_{II} = 442$),

III-III на радиусе $R_{6т} = 20I$ ($D_{III} = 402$).

Значения $\lambda_{1ад}$ определяем, заполняя таблицу 8 (значения c_1 берем из эспры скоростей, рис.40):

Таблица 8

Сечение	c_1	$c_{1ад} = \frac{c_1}{\varphi}$	T_o^*	$a_{кр} = 1814\sqrt{T_o^*}$	$\lambda_{1ад} = \frac{c_{1ад}}{a_{кр}}$
I-I	431	447	1000	573,8	0,78
II-II	463	480,3	1000	573,8	0,837
III-III	500	518	1000	573,8	0,903

Зная $\lambda_{1ад}$ и α , находим $\alpha_{1зф}$:

$$\alpha_{1зф I} = 17^{\circ}13', \quad \alpha_{1зф II} = 17^{\circ}15', \quad \alpha_{1зф III} = 17^{\circ}24'.$$

Принимаем

$$\alpha_{1к} = \alpha_{1зф} = 17^{\circ}15'.$$

Выбираем схему конструкции пера лопатки. Так как отношение

$$\frac{h}{D_{ср}} = \frac{46}{442} = \frac{1}{9,6},$$

что меньше $\frac{1}{9}$, то такую лопатку возможно спроектировать в виде некрученной лопатки постоянного профиля.

Полагая, что сопловая лопатка выполняется с полками и крепится неподвижно к наружному и внутреннему кольцам, в соответствии с рекомендациями § 7 принимаем ширину лопатки

$$s = s_{сА} - 2,5 = 30 - 2,5 = 27,5 \text{ мм}.$$

При выбранной конструкции лопатки все ее профили будут иметь такую ширину.

Оценим число лопаток так, чтобы на среднем радиусе относительный шаг близок к оптимальному. По графику в приложении 5 при известных $\alpha_o = 90^{\circ}$ и $\alpha_1 = 17^{\circ}35'$ определяем значение t_{opt} ,

$$t_{opt} = 0,72.$$

Угол установки профиля в решетке γ оцениваем по графику в приложении 4 (при $\alpha_{0к} = 88^\circ$, $\alpha_{1к} = 15 \text{ И}$), -
 $\gamma = 39^\circ 30'$.

Величина хорды

$$b = \frac{s}{\sin \gamma} = \frac{27,5}{\sin 39^\circ 30'} = 43,2 \text{ мм}.$$

Зная D_{II} , s , t_{opt} и γ , подсчитываем число лопаток по формуле аналогичной (23):

$$z_{с.а} = \frac{\pi \cdot D_{II} \cdot \sin \gamma}{t_{opt} \cdot s} = \frac{\pi \cdot 442 \cdot \sin 39^\circ 30'}{0,72 \cdot 27,5} = 44,4.$$

Принимаем $z_{с.а} = 44$.

При выбранном числе лопаток $z_{с.а}$ определяем значения t в трех сечениях: периферийном (I-I), среднем (II-II) и втулочном (III-III).

$$t_I = \frac{2\pi R_I}{z_{с.а}} = \frac{2\pi \cdot 241}{44} = 34,4 \text{ мм}, \quad t_{II} = \frac{2\pi \cdot 221}{44} = 31,6 \text{ мм},$$

$$t_{III} = \frac{2\pi \cdot 201}{44} = 28,7 \text{ мм}.$$

Относительные шаги на соответствующих радиусах составят:

$$\bar{t}_I = \frac{t_I}{b} = \frac{34,4}{43,2} = 0,795, \quad \bar{t}_{II} = \frac{31,6}{43,2} = 0,727,$$

$$\bar{t}_{III} = \frac{28,7}{43,2} = 0,664.$$

Полученные значения относительных шагов лежат в пределах допустимых отклонений от оптимального шага, которые составляют $+15$ + -10% от t_{opt} (см.сноску на стр. 74). В данном примере допустимый диапазон значений $\bar{t} = 0,648 + 0,828$.

Таким образом, принятая простая конструкция лопатки не приведет к существенному увеличению потерь.

для построения профиля необходимо оценить ряд величин:

а) толщину выходной кромки из условия $d_2 = (0,015 \div 0,04) b$ принимаем $d_2 = 0,8 \text{ мм}$ ($r_2 = 0,4 \text{ мм}$), что составляет $0,019b$ и лежит в пределах установленного диапазона;

б) радиус входной кромки оцениваем по формуле (6)

$$\frac{r_1}{b} = 1,89 \frac{r_2}{b} + 0,00204 K_K + 0,0138,$$

здесь

$$K_K = \frac{\sin \alpha_{0к}}{\sin \alpha_{1к}} = \frac{0,9994}{0,296} = 3,38$$

тогда

в) положение максимальной толщины профиля - принимаем

$$X_{d_m} = 0,28\delta = 0,28 \cdot 43,2 = 11,7 \text{ мм};$$

г) максимальную толщину из условия $d_m = (0,1 \div 0,2)\delta$ принимаем

$$d_m = 0,15\delta = 0,15 \cdot 43,2 = 6,45 \text{ мм};$$

д) угол γ проверяем с учетом \bar{d}_m и K_K по графику 2 (приложение 4), убеждаемся, что $\gamma \approx 40^\circ$.

е) входной угол заострения - по формуле (12)

$$\omega_1 = 3,79 \arctg \frac{z_{\max} - z_1}{X_{d_m} \cdot L_p},$$

L_p находим по графику (приложение 3)

$$L_p = 45 \text{ мм},$$

тогда

$$\omega_1 = 3,79 \arctg \frac{3,23 - 1,6}{0,28 \cdot 45} = 3,79 \cdot 7^\circ 16' = 28^\circ;$$

ж) выходной угол заострения - по формуле (13)

$$\omega_2 = 1,995 \arctg \frac{3,23 - 0,4}{0,72 \cdot 45} \approx 10^\circ.$$

Начнем построение профиля применительно к среднему сечению лопатки.

2. Построение профиля

Назначаем масштаб профилирования 10:1. Строим контур в последовательности, показанной на рис. 10. Конструктивный угол входа выполняем, как было выбрано, равным $\alpha_{ок} = 88^\circ$. Угол отгиба $\delta = 17^\circ 20'$ (рис. 41). Фактические значения d_{III} , ω_2 , X_{d_m} отличаются от оцененных, что допустимо (см. §§ 2,4).

Изобразив контур корыта соседней лопатки, получаем межлопаточный канал. Отделив зону постоянной ширины $a_2 = t_{II} \cdot \sin \alpha_{13\phi II} = 9,36 \text{ мм}$, убеждаемся, что оставшаяся область представляет собой плавно сужающуюся зону, т.е. канал конфузурный.

Полученный профиль является неизменным по всей высоте лопатки.

Найдем эффективные углы выхода в периферийном и втулочном сечениях

$$\alpha_{13\phi I} = \arcsin \frac{a_{2I}}{t_I} = \arcsin \frac{10,6}{34,4} = 17^\circ 56',$$

$$\alpha_{13\text{ФIII}} = \arcsin \frac{a_{2\text{III}}}{t_{\text{III}}} = \arcsin \frac{8,4}{28,7} = 17^\circ$$

Эти значения углов несущественно отличаются от значений, полученных в результате расчета по многим сечениям, поэтому лопатку в аэродинамическом отношении считаем сферифицированной.

3. Определение геометрических характеристик профиля

Методом сеток, описанным в § 6, определяем положение главных осей и главные моменты инерции. Результаты обмера профиля и расчет его характеристик дан в таблице 9, а изображение исследуемого профиля на рис.42.

$$J_X = 0,108 \text{ см}^4, \quad J_Y = 1,742 \text{ см}^4.$$

Находим моменты сопротивления:

а) для точки А

$$W_{X_A} = \frac{J_X}{Y_A} = \frac{0,108}{-0,63} = -0,1714 \text{ см}^3,$$

$$W_{Y_A} = \frac{J_Y}{X_A} = \frac{1,742}{-1,427} = -1,221 \text{ см}^3;$$

б) для точки С

$$W_{X_C} = \frac{J_X}{Y_C} = \frac{0,108}{-0,567} = -0,1905 \text{ см}^3,$$

$$W_{Y_C} = \frac{J_Y}{X_C} = \frac{1,742}{2,565} = 0,6791 \text{ см}^3;$$

в) для точки В

$$W_{X_B} = \frac{J_X}{Y_B} = \frac{0,108}{0,5} = 0,216 \text{ см}^3.$$

4. Определение сил, действующих на лопатки

Осевое усилие, действующее на одну сопловую лопатку:

$$P_a = \frac{1}{z_{c.A}} \left[p_0 F_0 + \frac{p_0 + p_{1\text{пер}}}{2} F_{\text{пер}} + \frac{p_0 + p_{16\tau}}{2} F_{6\tau} - p_1 F_1 - \frac{G}{g} (C_{1a} - C_{0a}) \right]$$

$p_{1\text{пер}}$ и $p_{16\tau}$ находим из эпюры распределения давлений (рис. 40):

$$p_{1\text{пер}} = 5,3 \text{ кг/см}^2, \quad p_{16\tau} = 4,6 \text{ кг/см}^2.$$

Расчетный лист

Объем: L II

определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля

Сечение II-II

№	K ₁	Ось O _x						Ось O _y						Ось O _z									
		K ₂	l _в	l _н	l _{в-н}	l _{в-н}	l _{в-н}	l _в	l _н	l _{в-н}	l _{в-н}	l _{в-н}	l _в	l _н	l _{в-н}	l _{в-н}	l _{в-н}	l _в	l _н	l _{в-н}	l _{в-н}	l _{в-н}	
1	0,5	0,35	26,4	26,9	-0,5	-0,25	53,3	17589	5,2	4,75	0,45	0,225	0,05	3,284	6,45	6,2	1,25	0,625	11,65	5,844			
2	1,5	2,35	23,2	17,1	6,1	0,15	40,3	03,890	5,65	4,25	1,4	2,1	0,9	23,067	8,1	4,35	3,75	5,625	12,45	20,006			
3	2,5	6,33	19,05	13,1	3,05	14,875	32,15	203,51	6,1	3,0	2,5	5,75	0,0	62,607	10,7	3,7	7,0	17,5	14,4	91,152			
4	3,5	12,55	14,3	10,3	4,0	14,0	24,6	303,516	6,5	3,45	2,85	0,775	0,75	100,210	15,6	3,15	12,60	44,275	10,95	233,654			
5	4,5	20,35	6,3	7,95	-1,65	-7,425	14,25	280,702	6,5	3,05	3,45	15,525	0,55	104,152	13,6	2,7	10,9	4,005	16,3	50,1370			
6	5,5	30,35		5,2	-5,2	-2,60	5,2	157,716	6,5	2,7	3,8	20,9	0,2	270,036	2,3	2,3	0	0	4,6	130,518			
7	6,5	42,5		0,5	-0,5	-3,25	0,5	21,15	6,4	2,4	4,0	26,0	0,0	372,24		2,0	-2,0	-13,0	2,0	84,6			
8	7,5	56,5							6,0	2,1	5,9	29,25	0,1	466,03		1,65	-1,65	-12,375	1,65	02,895			
9	8,5	72,3							4,3	1,75	5,55	24,675	0,05	437,415		1,4	-1,4	-11,0	1,4	101,22			
10	9,5	90,3								1,45	-1,45	-13,775	1,45	130,035		1,1	-1,1	-10,45	1,1	90,33			
11	10,5	110,3									1,2	-1,2	-12,6	1,2	132,36		0,55	-0,55	-3,675	0,55	30,805		
12	11,5	132,3								0,6	-0,6	-6,9	0,6	70,38									
13	12,5	156,3																					
14	13,5	182,3																					
15	14,6	210,3																					
16	15,5	240,3																					
17	16,5	272,3																					
18	17,5	308,3																					
19	18,5	342,3																					
20	19,5	380,3																					

-1,5	170,3	1040,00
M _{ox}	f ₁	J _{ox1}

18,12,5	0,4,0	220,230,1
M _{ox}	f ₂	J _{ox2}
392,5	168,5	1032,730
M _{ox}	f ₂	J _{ox2}

63,675	24,25	124,210
M _{ox}	f ₂	J _{ox2}
26,37	168,7	899,164
M _{ox}	f ₂	J _{ox2}

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3} = \frac{508,9}{3} = 169,63 \text{ см}^2$$

$$y_{C1} = \frac{M_{ox1}}{f} = \frac{-1,5}{169,63} = -0,00886 \text{ см}$$

$$y_{C2} = \frac{M_{ox2}}{f} = \frac{-392,5}{169,63} = -2,314 \text{ см}$$

$$J_{Cx1} = J_{ox1} - f \cdot y_{C1}^2 = 1086,871 \text{ см}^4$$

$$J_{Cx2} = J_{ox2} - f \cdot y_{C2}^2 = 17417,971 \text{ см}^4$$

$$A = J_{Cx1} + J_{Cx2} = 18504,842 \text{ см}^4$$

$$B = J_{Cy1} - J_{Cy2} = 16531,1 \text{ см}^4$$

$$x_{C1} = \frac{M_{oy1}}{f} = \frac{-282,7}{169,63} = -1,649 \text{ см}$$

$$J_{Cy1} = J_{oy1} - f \cdot x_{C1}^2 = 9554,63 \text{ см}^4$$

$$J_{Cy2} = A - J_{Cy1} = 8950,212 \text{ см}^4$$

$$C = J_{Cy2} - J_{Cx2} = 604,417 \text{ см}^4$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{A}\right)^2} = 17423,564$$

$$J_y = 1,742 \text{ см}^4$$

$$J_x = A - J_y = 1081,278$$

$$J_x = 0,108 \text{ см}^4$$

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_x} = \frac{16531,1}{16342,286} = 0,9999$$

$$2\alpha = 2^\circ 10'$$

$$\alpha = 1^\circ 5'$$

$$\text{Где } P_a = \frac{1}{48} \left[7,6 \cdot 58,7 + \frac{7,6+5,3}{2} \cdot \frac{\pi}{4} (46,6^2 - 46,4^2) + \frac{7,6+4,6}{2} \cdot \frac{\pi}{4} (42^2 - 41,8^2) - 5,09 \cdot \pi \cdot 44,2 \cdot 4,8 - \frac{16,77}{981} (13200 - 11000) \right] = 25,3 \text{ кг} .$$

Окружное усилие, действующее на одну сопловую лопатку, подсчитаем по формуле (26):

$$P_u = -\frac{G}{g \cdot z_{c.a.}} (c_{iu} - c_{ou}) = -\frac{16,77}{981 \cdot 48} (-44100 + 0) = 15,7 \text{ кг} .$$

Определим интенсивность газовой нагрузки в осевом и окружном направлениях (27,28):

$$q_a = \frac{P_a}{h_{cp}} = \frac{25,3}{4,6} = 5,5 \text{ кг/см} ;$$

$$q_u = \frac{P_u}{h_{cp}} = \frac{15,7}{4,6} = 3,41 \text{ кг/см} .$$

Найдем интенсивность нагрузки в направлении главных осей по формулам (29) при $\alpha_a = 40^\circ 15'$ (см. рис.42):

$$q_x = 0,92 \text{ кг/см}; \quad q_y = 6,41 \text{ кг/см}.$$

Изгибающие моменты, действующие на лопатку, определим по формуле (30), так как лопатку первого соплового аппарата можно представить как балку на двух опорах с равномерно распределенной нагрузкой.

$$\text{В среднем сечении: } M_x = 17 \text{ кгсм}; \quad M_y = 2,44 \text{ кгсм}.$$

5. Проверка лопатки на прочность

Определяем напряжения изгиба:

в точке А

$$\sigma_{aA} = \frac{M_y}{W_{yA}} - \frac{M_x}{W_{xA}} = \frac{2,44}{-1,221} - \frac{17}{-0,1714} = 97,18 \text{ кг/см}^2 ,$$

в точке В

$$\sigma_{aB} = \frac{2,44}{-19,36} - \frac{17}{0,216} = -78,82 \text{ кг/см}^2 ,$$

в точке С

$$\sigma_{aC} = \frac{2,44}{0,679} - \frac{17}{-0,1905} = 92,83 \text{ кг/см}^2 .$$

Для лопаток первого сепараторного аппарата выбрали материал ИС-6К. Температура, при которой работает среднее сечение, равна $1,08 \cdot 727^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C} = 835^{\circ}\text{C}$. Для этой температуры предел длительной прочности $\sigma_{2000} = 24 \text{ кг/мм}^2 = 2400 \text{ кг/см}^2$ (приложение 8).
Запас прочности:

$$K = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\max}} = \frac{2400}{97,18} = 24,7$$

Как видно, запас прочности очень большой, поэтому лопатку выполняем полой с минимальной толщиной стенок 1,1 мм (рис.44).

Находим главные моменты инерции и положение главных осей инерции для профиля такой лопатки (таблица 10).

$$J_X = 0,083 \text{ см}^4, \quad J_Y = 1,389 \text{ см}^4.$$

Определяем моменты сопротивления и напряжения изгиба в облепченной лопатке:

$$W_{X_A} = \frac{0,083}{-0,636} = -0,132 \text{ см}^3, \quad W_{Y_A} = \frac{1,389}{-1,62} = -0,856 \text{ см}^3,$$

$$W_{X_B} = \frac{0,083}{0,538} = 0,144 \text{ см}^3, \quad W_{Y_B} = \frac{1,384}{-0,25} = -5,544 \text{ см}^3,$$

$$W_{X_C} = \frac{0,083}{-0,498} = -0,169 \text{ см}^3, \quad W_{Y_C} = \frac{1,384}{2,375} = 0,584 \text{ см}^3;$$

$$\sigma_{u_A} = \frac{2,44}{-0,856} - \frac{17}{-0,132} = 125,93 \text{ кг/см}^2,$$

$$\sigma_{u_B} = \frac{2,44}{-5,544} - \frac{17}{0,144} = -118,44 \text{ кг/см}^2,$$

$$\sigma_{u_C} = \frac{2,44}{0,584} - \frac{17}{-0,169} = 104,98 \text{ кг/см}^2.$$

Запас прочности: $K = \frac{2400}{125,93} = 19,05.$

Удовлетворившись таким запасом прочности, проектирование заканчиваем

Более строгой была бы проверка лопатки на прочность не только на расчетном режиме работы турбины, указанном в [21], но и на других режимах, более "тяжелых" по нагрузкам.

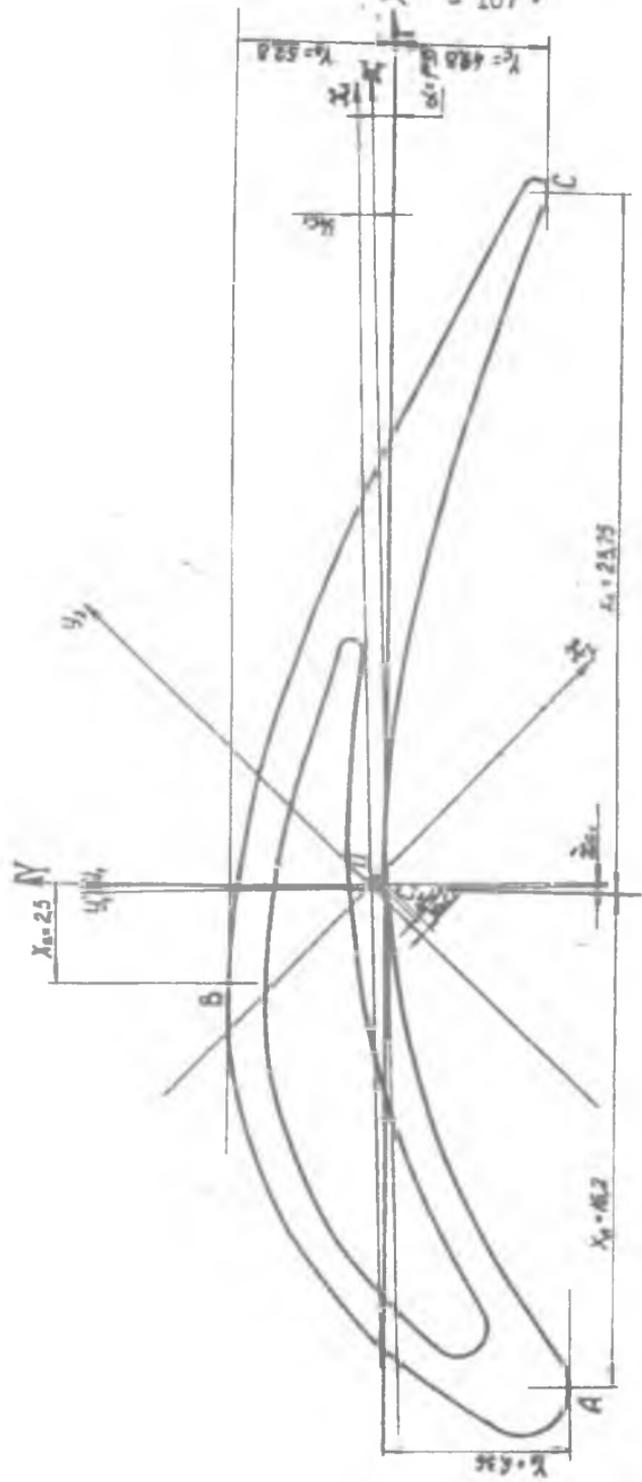


Рис. 43.

Расчетный лист

Объект С.В. 1^я ступень

Определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля

Сечение II-II (обт. 24)

№	K ₁	K ₂	Ось OX ₁						Ось OY ₁						Ось OY ₀					
			b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₁₅	b ₁₆	b ₁₇
1	0,5	0,33	10,25	19,4	-9,15	-4,575	2,065	9,784	2,4	2,5	-0,1	0,05	4,0	1,617	3,8	3,4	0,2	0,1	6,4	2,14
2	1,5	2,95	5,5	12,1	-6,7	-10,05	17,7	4,241	2,5	2,5	0	0	5,0	11,65	5,7	2,95	0,75	1,125	6,65	15,41
3	2,5	6,35	0,1	9,75	-3,86	-3,775	16,16	10,223	2,5	2,51	-0,01	-0,025	5,01	54,713	4,65	2,9	1,75	4,375	2,55	17,71
4	3,5	12,33	0,5	9,2	0,1	0,55	18,5	32,105	2,55	2,5	0,05	0,175	5,05	62,266	4,95	3,15	1,8	6,3	3,1	29,85
5	4,5	20,33	2,5	7,05	-0,45	-2,025	12,45	314,000	2,6	3,0	-0,4	-1,6	5,6	113,340	2,22	2,3	6,52	20,34	11,02	34,21
6	5,5	30,33		5,2	-5,2	-2,08	5,2	152,716	2,75	2,7	0,05	0,275	5,45	165,298	2,5	2,5	0,2	1,1	4,8	145,81
7	6,5	42,5		0,5	-0,5	-9,25	0,5	21,45												
8	2,5	56,3							3,0	2,1	1,8	1,8	6,0	337,8		1,65	1,65	-12,375	1,65	92,48
9	8,5	72,3							4,5	1,75	2,55	21,675	6,05	137,116		1,4	-1,4	-14,9	1,4	101,6
10	0,5	80,3								1,45	-1,45	-12,775	1,45	180,935		1,1	-1,1	-10,45	1,1	20,33
11	10,5	110,3								1,2	-1,2	-12,6	1,2	132,36		0,35	-0,35	-3,675	0,35	38,60
12	11,5	132,3								0,6	-0,6	-0,9	0,6	79,38						
13	12,5	156,3																		
14	13,5	182,3																		
15	14,5	210,3																		
16	15,5	240,3																		
17	16,5	272,3																		
18	17,5	306,3																		
19	18,5	342,3																		
20	19,5	380,3																		

58,58	103,15	874,924
M _{Ox1}	f ₁	J _{Ox1}

4,745	51,76	1754,817
M _{Oy1}	f ₁	J _{Oy1}
10,98	103,22	1000,000
M _{Oy0}	f ₀	J _{Oy0}

-8,06	51,03	669,24
M _{Oy0}	f ₀	J _{Oy0}
-16,86	103,21	1000,000
M _{Oy0}	f ₀	J _{Oy0}

$$f = \frac{f_1 + f_0 + f_2}{2} = \frac{510,51}{2} = 103,503 \text{ см}$$

$$y_{C1} = \frac{M_{Ox1}}{f} = \frac{-56,525}{103,503} = -0,546 \text{ см}$$

$$J_{Ox1} = J_{Ox0} + f \cdot y_{C1}^2 = 812,916 \text{ см}^4$$

$$A = J_{Ox1} + J_{Oy1} = 14718,975 \text{ см}^4$$

$$x_{2C1} = \frac{M_{Oy1}}{f} = \frac{-36,24}{103,503} = 0,351 \text{ см}$$

$$J_{C1} y_2^2 = A - J_{Ox1} = 6077,313 \text{ см}^4$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = 13806,132$$

$$J_z = A - J_y = 832,837$$

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_z} = 0,9885$$

$$y_{C0} = \frac{M_{Oy0}}{f} = \frac{-16,86}{103,503} = -0,163 \text{ см}$$

$$J_{Oy0} = J_{Oy1} - f \cdot y_{C0}^2 = 13875,061 \text{ см}^4$$

$$B = J_{Oy0} - J_{C1} x_2^2 = 13031,147 \text{ см}^4$$

$$J_{C1} x_2^2 = J_{Oy0} - f = 13031,147 \text{ см}^4$$

$$C = J_{Oy1} - J_{C1} y_2^2 = 764,349 \text{ см}^4$$

$$J_y = 13809 \text{ см}^4$$

$$J_z = 833 \text{ см}^4$$

$$\alpha = 9,35'$$

Пример 2. Спрофилировать сопловую лопатку 3-ей ступени турбины.

В расчете по многим сечениям был выбран закон закрутки лопаток соплового аппарата

$$\alpha_1 = \text{const} ,$$

определены параметры потока на высоте канала и размеры тракта соплового аппарата (рис. 44, а):

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 74^{\circ}30' , & \alpha_1 &= 21^{\circ}45' , \\ \rho_0 &= 2,18 \text{ кг/см}^2 , & \rho_{1cp} &= 1,26 \text{ кг/см}^2 , \\ C_{a0} &= 140,60 \text{ м/сек} , & C_{a1cp} &= 174,60 \text{ м/сек} , \\ C_{u0} &= 39,00 \text{ м/сек} , & C_{u1cp} &= 436,00 \text{ м/сек} , \\ T_0^* &= 708,8^{\circ}\text{К} , & \varphi_{np} &= 0,971 , \\ & & G &= 16,768 \text{ кг/сек} ; \end{aligned}$$

$$\lambda_{1ад} = f(R) , \quad p_1 = f(R) , \quad \text{рис. 44, а.}$$

I. Подготовка к профилированию

Оценим конструктивный угол входа в сопловый аппарат:

$$\alpha_{0к} = 74^{\circ}30' - 2^{\circ}30' = 72^{\circ} .$$

С помощью приложения I определяем $\alpha_{1эф}$.

Из расчета по многим сечениям имеем:

$$\lambda_{1ад.пер} = 0,774 \quad (R = 274,25) ,$$

$$\lambda_{1ад.ср} = 0,975 \quad (R = 221) ,$$

$$\lambda_{1ад.вм} = 1,17 \quad (R = 167,75) .$$

Зная $\lambda_{1ад}$ и α , находим $\alpha_{1эф}$:

$$\alpha_{1эф.пер} = 21^{\circ}05' , \quad \alpha_{1эф.ср} = 21^{\circ}45' .$$

Так как $\lambda_{1ад.вм} > 1$, то угол $\alpha_{1эф}$ в этом сечении находим по уравнению, аналогичному (2):

$$\alpha_{1эф} = \arcsin \left[\frac{\sin \alpha_1}{\cos \frac{\delta - \omega_2}{2}} \cdot \frac{y(\varphi_{np} \cdot \lambda_{1ад} \cdot \pi(\lambda_{1ад}))}{y(\varphi_0 - n) \cdot \pi(1)} \right] =$$

$$= \arcsin \left[\frac{\sin 21^{\circ}45'}{\cos 0^{\circ}} \cdot \frac{\psi(0,971 \cdot 1,17) \cdot \pi(1,17)}{\psi(0,99) \cdot \pi(1)} \right] =$$

$$= \arcsin \left[\frac{0,37}{1} \cdot \frac{2,22 \cdot 0,42}{1,826 \cdot 0,54} \right] = \arcsin 0,351 = 20^{\circ}41'.$$

При использовании газодинамических функций коэффициент адиабаты принимается равным $\kappa = 1,33$.

Строим эпюру распределения углов $\alpha_{1\varepsilon\varphi}$ вдоль радиуса (рис. 44б). Принимаем за контрольные сечения среднее и два крайних на радиусах:

$$R_I = 266 \text{ мм}, \quad R_{II} = 221 \text{ мм}, \quad R_{III} = 176 \text{ мм}.$$

Углы $\alpha_{1\varepsilon\varphi}$ в выбранных сечениях снимаем с эпюры (рис. 44б):

$$\alpha_{1\varepsilon\varphi I-I} = 21^{\circ}12', \quad \alpha_{1\varepsilon\varphi II-II} = 21^{\circ}45', \quad \alpha_{1\varepsilon\varphi III-III} = 21^{\circ}15'.$$

Принимаем: $\alpha_{1\kappa} = \alpha_{1\varepsilon\varphi}$

Принимаем ширину лопатки в сечении I-I: $S_I = 40 - 3 = 37 \text{ мм}$.

По графику в приложении 5 находим оптимальную величину \bar{t} .

Для сечения I-I: $\bar{t}_I = 0,69$.

Угол установки профиля находим по графику в приложении 4: $\gamma = 47^{\circ}$.

Подсчитываем число лопаток:

$$z_{с.а.} = \frac{\pi \cdot 532 \cdot 0,7314}{0,69 \cdot 37} = 47,9.$$

Принимаем $z = 48$.

Выбираем схему конструкции лопатки. Так как отношение

$$\frac{h_{ср}}{D_{ср}} = \frac{99,25}{442} = \frac{1}{4,5} > \frac{1}{8},$$

то лопатки соплового аппарата должны выполняться с переменным профилем. Выбираем конструкцию лопатки с выходной кромкой, перпендикулярной оси турбины, причем контуры корыта и спинки ее выполняем наклонными цилиндрическими поверхностями.

До начала профилирования наиболее достоверно можно судить о ширине периферийного сечения S_I , так как она незначительно отличается от известной из газодинамического расчета ширины венца $S_{с.а.}$.

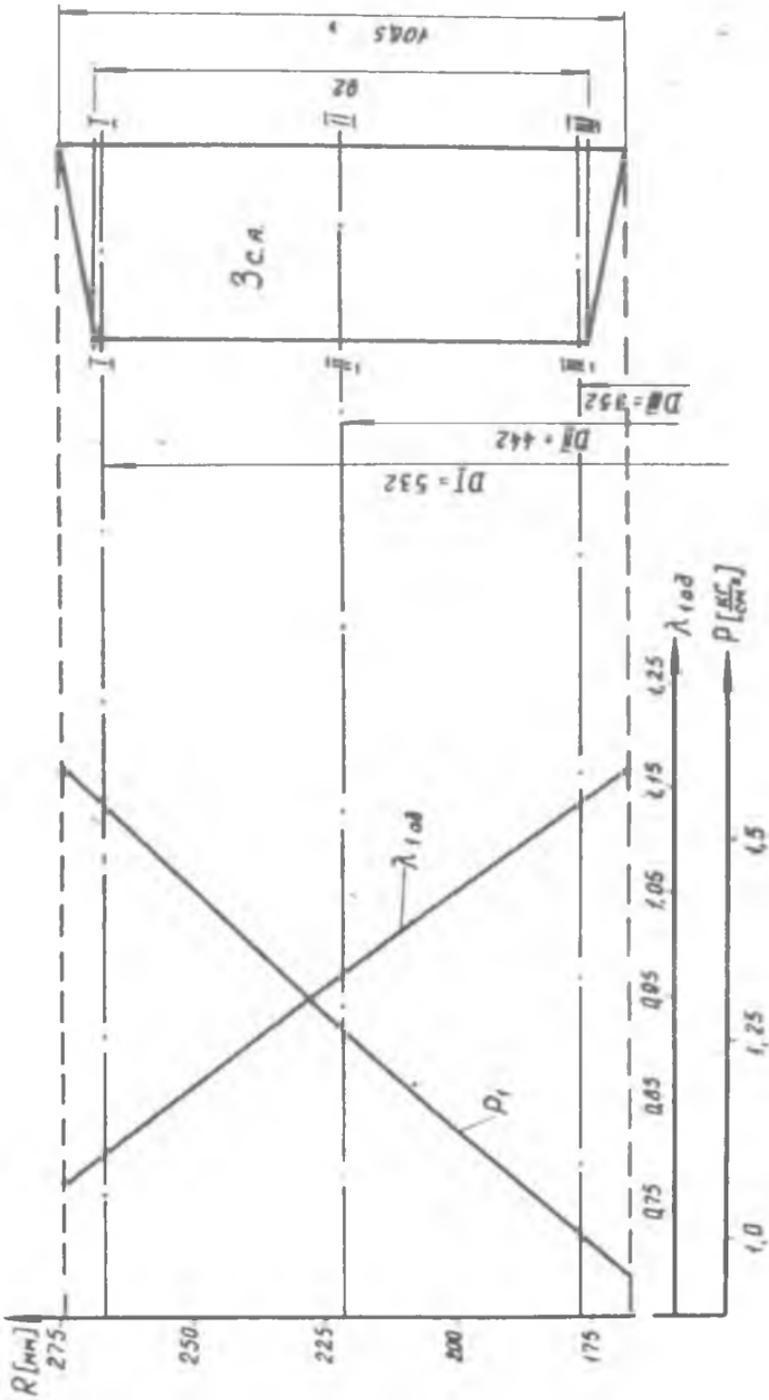


Рис. 448.

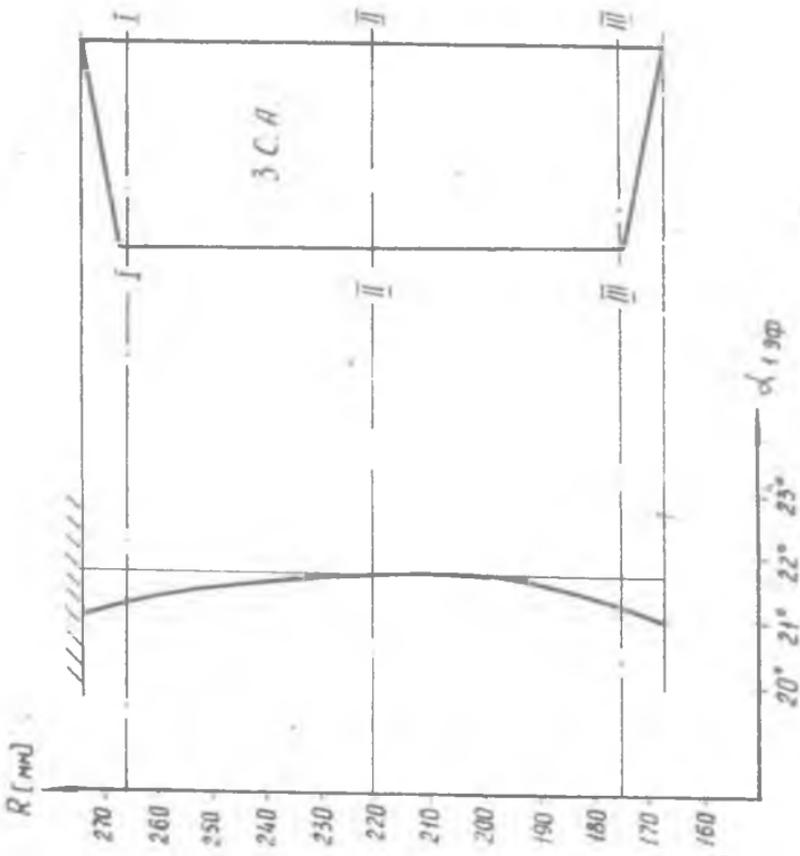


Рис. 446.

Поэтому проектирование начинаем с построения профиля сечения I-I. Соответствующее ему значение t составляет:

$$t_I = \frac{2\pi R_I}{z_{c.A}} = \frac{2\pi \cdot 266}{48} = 34,9 \text{ мм},$$

Хорда

$$\beta_I = \frac{s_I}{\sin \gamma} = \frac{37}{0,7314} = 50,6 \text{ мм}.$$

Для построения профиля сечения I-I необходимо оценить ряд величин:

а) толщину выходной кромки из диапазона $d_2 = (0,01 \pm 0,05)$ принимаем $d_2 = 1 \text{ мм}$ $r_2 = 0,5 \text{ мм}$;

б) радиус входной кромки подсчитываем по формуле (6). Для использования ее находим $\frac{z_2}{\beta}$ и K_K (при оценке K_K принимаем $\alpha_{1K} = 21^\circ 22'$)

$$\frac{z_2}{\beta} = \frac{0,5}{50,4} = 0,00988,$$

$$K_K = \frac{\sin 72^\circ}{\sin 21^\circ 22'} = 2,61,$$

$$\frac{z_1}{\beta} = 1,89 \cdot 0,00988 - 0,00204 \cdot 2,61 + 0,0138 = 0,0272,$$

$$z_1 = 50,6 \cdot 0,0272 = 1,4 \text{ мм};$$

в) относительное положение максимальной толщины профиля определяем по графику в приложении 2:

$$\bar{X}_{d_m} = 0,24, \quad X_{d_m} = 50,6 \cdot 0,24 = 12,14 \text{ мм};$$

г) максимальную толщину $d_m = 0,1\beta = 5,06 \text{ мм}$

Имея значения K_K и d_m , по графику приложения 4 уточняем угол установки γ . Получаем $\gamma = 46^\circ$. По этому значению γ корректируем прежде подсчитанные величины:

а) хорду

$$\beta_1 = \frac{37}{\sin 46^\circ} = 51,4 \text{ мм};$$

б) радиус входной кромки

$$\frac{z_1}{\delta} = 1,89 \cdot 0,00973 - 0,00204 \cdot 2,64 + 0,0138 = 0,0268,$$

$z_1 = 1,4$

в) положение максимальной толщины профиля

$$X_{d_m} = 51,4 \cdot 0,24 = 12,34 \text{ мм};$$

2) максимальную толщину

$$d_m = 0,1 \delta = 5,14 \text{ мм};$$

д) входной угол заострения определяем по формуле (8):

$$\omega_1 = 3,79 \arctg \frac{2,57 - 1,4}{0,24 \cdot L_p} = 17^\circ.$$

значение L_p определили по графику в приложении 3, имея

$$z_1 + z_2 = 0,0268 + 0,00973 = 0,036,$$

$$\theta_k = 180^\circ - (72^\circ + 21^\circ 15') = 86^\circ 45',$$

$$\frac{L_p}{\delta} = 1,099, \quad L_p = 1,099 \cdot 51,4 = 56,5 \text{ мм};$$

в) выходной угол заострения

$$\omega_2 \leq 1,995 \arctg \frac{2,57 - 0,5}{0,76 \cdot 56,5} = 5^\circ.$$

2. Построение профиля

После оценки этих величин приступаем к построению сечения I-I. При этом обратим внимание на два обстоятельства:

а) как показано в описании метода, для рассматриваемого случая профиля на выходе, должны иметь прямолинейные участки;

б) расчетный режим работы проектируемого аппарата характерен большими значениями приведенных скоростей, особенно у втулки ($\lambda_{\text{вдв}} = 1,17$). Поэтому решетки должны отличаться малыми значениями углов отгиба δ .

Периферийное сечение выполнено с некоторыми отклонениями от выбранных величин, кроме того, из-за трудностей в обеспечении малых углов δ не удастся осуществить сопряжение участков спинки (рис. 45) без скачка кривизны в точке сопряжения.

Получили следующие геометрические характеристики спроектированной решетки в сечении I-I:

Сеч.	t	β	t̄	α _{ок}	α _{1эф}	δ	τ ₁	τ ₂	ω ₁	ω ₂	γ
I-I	34,9	52,4	0,656	72°30'	21°12'	10°30'	1,4 мм	0,5 мм	19°	5°	42°

Приступаем к построению втулочного сечения. Прежде всего определяем:

а) шаг

$$t_{III} = \frac{2\pi R_{III}}{z} = \frac{2\pi \cdot 176}{48} = 23 \text{ мм};$$

б) величину горла

$$a_{III} = t \cdot \sin \alpha_{1эф, \beta m} = 23 \cdot 0,3423 = 7,87 \text{ мм}.$$

Строим профиль, как описано в § 9, используя рекомендации относительно угла отгиба: $\delta = 447^\circ$, так как у втулки сверхзвуковой петок. Полученный профиль имеет следующие параметры:

Сеч.	t	β	t̄	α _{ок}	α _{1эф}	δ	τ ₁	τ ₂	ω ₁	ω ₂	γ
II-II	23	45	0,511	71°30'	21°	8°	1,4	0,5	17°	5°	48°

Как видно, у втулки получилась весьма густая решетка и большой угол отгиба. Никакие вариации с полученными профилями не привели к желаемым результатам, поэтому в данном случае оказалось целесообразным выбрать меньшее число лопаток.

Число лопаток определяем по среднему сечению:

$$\frac{t}{\beta_{II}} = 0,69, \quad \beta = \frac{\beta_I + \beta_{III}}{2} = \frac{45 + 52,4}{2} \approx 49, \quad t_2 = 0,69 \cdot 49 = 33,85 \text{ мм},$$

тогда
$$z_{с.с.} = \frac{2\pi \cdot 221}{33,85} = 41.$$

Для полученного числа лопаток находим:

$$t_I = \frac{2\pi \cdot 266}{41} = 40,74 \text{ мм}, \quad \alpha_I = 40,74 \sin 21^\circ 12' = 14,75 \text{ мм},$$

$$t_{III} = \frac{2\pi \cdot 176}{41} = 27 \text{ мм}, \quad \alpha_{III} = 27 \sin 21^\circ 15' = 9,4 \text{ мм}.$$

Строим периферийное, среднее и втулочное сечения (рис.46).

Выбранный вариант характеризуется следующими геометрическими параметрами (табл.II).

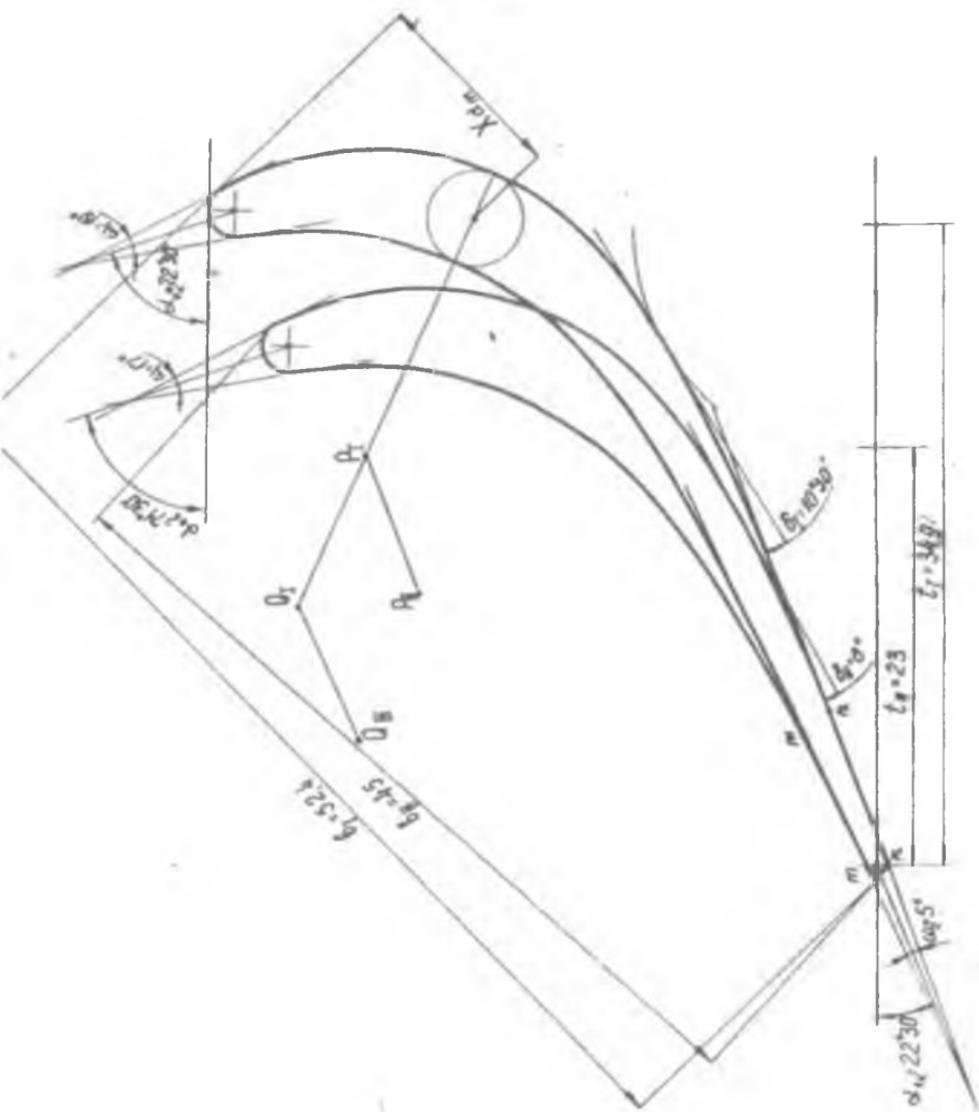


Рис. 45.

Таблица II

Сеч.	β	t	\bar{t}	$\alpha_{0к}$	ω_1	$\alpha_{1эФ}$	ω_2	δ	γ	X_{dm}	d_m	z_1	z_2
I-I	54	40,74	0,755	$69^{\circ}30'$	21°	$21^{\circ}12'$	$5^{\circ}9^{\circ}30'$	42°		12	5,6	1,3	0,5
II-II	49,45	33,85	0,685	72°	19°	$21^{\circ}10'$	$5^{\circ}8^{\circ}$	43°		12	5,1	1,25	0,5
III-III	44,9	27	0,601	$74^{\circ}45'$	$17^{\circ}30'$	$21^{\circ}15'$	$5^{\circ}6^{\circ}30'$	44°		11,9	4,5	1,2	0,5

3. Определение геометрических характеристик профиля

Методом сеток определяем моменты инерции периферийного сечения относительно главных осей:

$$J_x = 0,187 \text{ см}^4, \quad J_y = 3,93 \text{ см}^4,$$

(результаты обмера профиля в табл. I2, изображение на рис. 47).

Определяем моменты сопротивления:

а) для входной точки А

$$W_{x_A} = \frac{J_x}{Y_A} = \frac{0,187}{-0,98} = -0,191 \text{ см}^3,$$

$$W_{y_A} = \frac{J_y}{X_A} = \frac{3,93}{-1,92} = -2,05 \text{ см}^3;$$

б) для точки В

$$W_{x_B} = \frac{0,187}{0,55} = 0,34 \text{ см}^3,$$

$$W_{y_B} = \frac{3,93}{-0,16} = -24,56 \text{ см}^3;$$

в) для выходной точки С

$$W_{x_C} = \frac{0,187}{-0,595} = -0,314 \text{ см}^3,$$

$$W_{y_C} = \frac{3,93}{3,28} = 1,17 \text{ см}^3$$

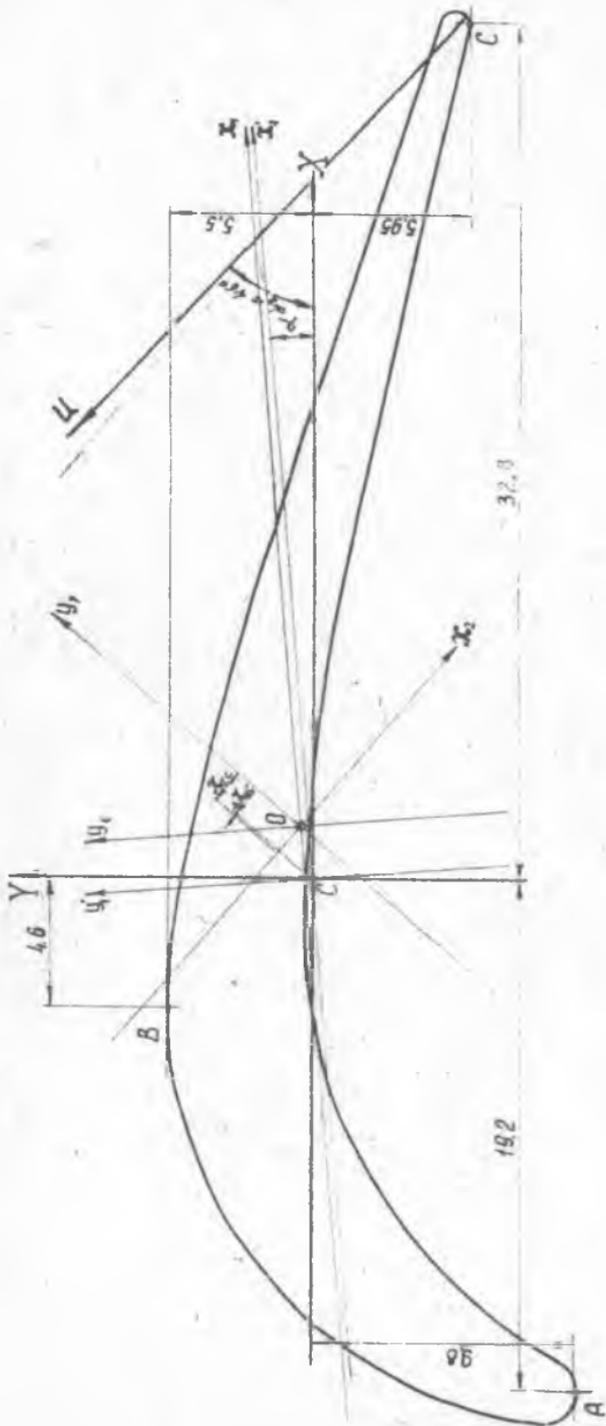


Рис. 47.

Расчетный лист															Объем СЛ 34 ступени																								
Определены площади, положения центра тяжести и моменты инерции профиля															Сечение 1-1																								
Ось O _{x1}															Ось O _{y1}				Ось O _{y2}																				
N°	H ₁	K ₂	P ₁	P ₂	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃	S ₂₄	S ₂₅	S ₂₆	S ₂₇	S ₂₈	S ₂₉	S ₃₀	S ₃₁	S ₃₂			
1	0.5	0.53	30.1	20.6	0.5	4.75	50.7	16.74	4.55	4.3	0.25	0.125	0.85	2.02	3.1	4.65	0.45	0.225	9.75	3.22																			
2	1.5	2.33	26.7	18.5	10.2	18.3	43.2	100.6	4.4	4.05	0.75	1.125	4.45	20.6	5.7	4.25	1.45	2.175	0.05	2.32																			
3	2.5	6.33	22.6	14.0	0.0	21.5	36.6	32.95	5.07	3.8	1.27	3.175	0.47	58.2	6.6	3.9	2.7	6.75	10.5	66.6																			
4	3.5	12.33	18.0	12.0	6.0	21.0	30.0	37.05	5.36	3.58	1.81	6.335	0.91	122.2	8.1	3.55	4.55	15.025	14.65	143.75																			
5	4.5	20.33	12.2	10.3	1.0	25.0	22.5	43.70	5.55	3.35	2.2	4.0	0.9	180.5	14.4	3.25	11.5	50.25	17.05	358.5																			
6	5.5	30.33	3.0	8.4	-5.0	31.0	11.0	35.40	5.75	3.1	2.65	14.96	0.85	168.4	17.6	3.05	14.55	40.0	20.65	628.0																			
7	6.5	42.5		7.5	-2.5	40.75	7.5	31.6	5.94	2.95	2.96	10.48	0.80	376.0	0.0	2.75	6.25	40.65	11.75	107.5																			
8	7.5	56.5		4.5	-4.5	51.1	4.5	23.4	6.1	2.75	3.35	25.18	0.85	492.0		2.55	25.5	19.12	2.55	144.4																			
9	8.5	72.3		2.0	-2.0	47.0	2.0	14.4	6.28	2.5	3.78	52.1	0.78	834.0		2.3	-2.3	12.53	2.3	166.0																			
10	9.5	90.3							6.4	2.35	4.05	38.5	0.75	780.0		2.1	-2.1	10.95	2.1	168.3																			
11	10.5	110.3							5.95	2.1	3.85	40.4	0.65	680.0		1.85	1.85	19.13	1.85	232.0																			
12	11.5	132.3								1.9	-1.9	21.83	1.0	251.4		1.6	1.6	18.4	1.6	211.8																			
13	12.5	156.3								1.7	-1.7	22.25	1.7	265.6		1.4	1.4	17.5	1.4	210.0																			
14	13.5	182.3								1.45	1.45	10.59	1.45	264.5		1.0	-1.0	13.5	1.0	182.3																			
15	14.5	210.3								1.25	-1.25	15.12	1.25	289.0																									
16	15.5	240.3								0.4	-0.4	-6.2	0.4	96.2																									
17	16.5	272.3																																					
18	17.5	308.3																																					
19	18.5	348.3																																					
20	19.5	390.3																																					

3764	20645	2399.01
M ₀₁	J ₀₁	J ₀₂

104.05	104.05	1076.53
M ₀₁ /4	J ₀₁ /2	J ₀₂ /8
49.04	208.1	509.18
M ₀₂	J ₀₃	J ₀₄

62.52	104.7	3054.37
M ₀₁ /2	J ₀₂	J ₀₄ /4
27.1	208.1	114.56.68
M ₀₂	J ₀₃	J ₀₄

$$f = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{S} = \frac{20865}{S} \text{ см}^2$$

$$y_{C1} = \frac{M_{01}}{f} = \frac{3764}{20865} = 0.2762 \text{ см}$$

$$J_{C1x} = J_{01} + f y_{C1}^2 = 2204.083 \text{ см}^4$$

$$A = J_{01} + J_{C1x} = 41172.24 \text{ см}^4$$

$$x_{2C1} = \frac{M_{02}}{f} = \frac{-274}{20865} = -1.313 \text{ см}$$

$$J_{C1y} = A - J_{02} = 17005.08 \text{ см}^4$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = 39290.04$$

$$J_x = A - J_y = 18732$$

$$\cos 2\alpha = \frac{J_y - J_x}{J_y + J_x} = 0.9976 \quad 2\alpha = 0^\circ$$

J _y = 303 см ⁴
J _x = 0187 см ⁴
α = 4°30'

4. Определение сил, действующих на лопатку

Осевое усилие, действующее на одну сопловую лопатку [по (25)]:

$$P_a = \frac{1}{41} \left[2,18 \cdot \pi \cdot 44,2 \cdot 9,2 + \frac{2,18+1,6}{2} \cdot \frac{\pi}{4} (54,85^2 - 53,4^2) + \frac{2,18+0,95}{2} \cdot \frac{\pi}{4} (35^2 - 33,55^2) - \frac{16,768}{981} (17460 - 14060) - 1,26 \cdot \pi \cdot 44,2 \cdot 10,65 \right] = 29,78 \text{ кг}$$

Окружное усилие, действующее на одну сопловую лопатку [по (26)]:

$$P_u = \frac{16,768}{981 \cdot 41} (-43600 + 3900) = 20,43 \text{ кг.}$$

Определяем осевую и окружную составляющие газовой нагрузки на единицу длины лопатки по [(27) и (28)]:

$$q_a = \frac{29,78}{9,925} = 3 \text{ кг/см.} \quad q_u = \frac{20,43}{9,925} = 2,06 \text{ кг/см.}$$

Найдем нагрузки в направлении главных осей [по (29)]:

$$q_x = 3 \cdot \sin 46^\circ - 2,06 \cdot \cos 46^\circ = 0,728 \text{ кг/см.}$$

$$q_y = 3 \cdot 0,6941 + 2,06 \cdot 0,7193 = 3,564 \text{ кг/см.}$$

Найдем изгибающие моменты, действующие на лопатку.

Схематично лопатку 3-го соплового аппарата можно представить как консольную балку с равномерно распределенной нагрузкой. Наиболее опасное сечение будет у заделки, поэтому рассчитываем на прочность периферийное сечение. Момент в этом сечении определяется по формулам:

$$M_x = \frac{q_y \cdot h^2}{2} = \frac{3,564 \cdot 9,925^2}{2} = 175,5 \text{ кгсм,}$$

$$M_y = \frac{q_x \cdot h^2}{2} = \frac{0,728 \cdot 9,925^2}{2} = 35,85 \text{ кгсм.}$$

Определяем напряжения изгиба:

в точке А

$$\sigma_{uA} = \frac{35,85}{-2,05} - \frac{175,5}{-0,191} = -17,49 + 919 = 901,51 \text{ кг/см}^2,$$

в точке В

$$\sigma_{uB} = \frac{35,85}{-8,54} - \frac{175,5}{0,34} = -520,2 \text{ кг/см}^2,$$

в точке С

$$\sigma_{uC} = \frac{35,85}{1,17} - \frac{175,5}{0,314} = 589,54 \text{ кг/см}^2.$$

4. Лопатки 3-го соплового аппарата изготовлены из сплава ЭИ-437Б. Температура, при которой работает верхнее сечение, составляет $1,08 \cdot (708,8^{\circ} - 273^{\circ}) + 50^{\circ} = 520,7^{\circ}\text{C}$.

При этой температуре для длительности работы, равной 2000 часов,

$$\sigma_{\delta 2000}^{520} = 7250 \text{ кг/см}^2.$$

Запас прочности

$$K = \frac{7250}{901,51} = 8,05.$$

Проектирование пера заканчиваем координированием его профилей.

Пример 3. Профилирование лопаток с выходной кромкой, наклонной к оси турбины. В качестве примера была спрофилирована лопатка 3-й ступени турбины с выходной кромкой, наклонной к оси турбины (по тем же исходным данным, по которым спроектирована лопатка в примере 2).

Сохранив построенное уже периферийное сечение, строим втулочное сечение в несколько приемов.

1. В первом приближении принимаем, что входная и выходная кромки наклонены одинаково. Оценим из условия оптимального относительного шага ширину втулочного сечения.

$$\bar{t} = 0,69, \quad t_{III} = 27, \quad \theta_{III} = \frac{27}{6,69} = 39,13, \quad \gamma = 46^{\circ}30',$$

$$S_{III} = 39,13 \cdot 0,7254 = 28,38.$$

Расположив втулочное сечение симметрично относительно периферийного (. . .), пристраиваем выходную кромку, сохраняя ту же спинку. Проверка угла отгиба δ_{III} показала, что он не равен требуемому, а именно: $\delta_{III} = 10^{\circ}$ вместо $7^{\circ}+4^{\circ}$; кроме того, в этом случае полу-

чается большой угол выхода $\alpha_{13\phi} = 22^{\circ}45'$ вместо $\alpha_{13\phi} = 21^{\circ}15'$

Перестраиваем спинку профиля Ш-Ш, для этого проводим эквидистанту к контуру спинки периферийного сечения на расстоянии $\Delta R_{\text{сп}} = 19$ мм. Получили $\delta = 7^{\circ}$, $\alpha_{13\phi} = 22^{\circ}$. Видно, что эффективный угол выхода опять больше требуемого.

Сдвигая еще немного влево, добиваемся необходимых значений δ и $\alpha_{13\phi}$, после чего пристраиваем корыто эквидистантно корыту сечения I-I. Радиус выходной кромки при выбранной ширине получается однозначным, угол входа оказался большим. Получить угол входа менее 78° не удастся, несмотря на вариации с корытом и радиусом входа. При дальнейшем движении влево, т.е. при увеличении $\Delta R_{\text{сп}}$, получается уменьшение эффективного угла выхода, что недопустимо. Подняв выходную кромку несколько выше ($\Delta S_2 > \Delta S_1$) и сдвигая профиль Ш-Ш, добиваемся нужных углов: $\delta = 6^{\circ}$, $\alpha_{13\phi} = 21^{\circ}20'$, $\alpha_{0\kappa} = 75^{\circ}30'$ и оптимального шага $\bar{t} = 0,631$.

После построения периферийного и втулочного сечений проектируем среднее сечение следующим образом: расстояние между спинками сечений I-I и Ш-Ш делим пополам и проводим спинку среднего сечения, аналогично пристраиваем корыто.

Построенная лопатка (рис.50) имеет следующие геометрические параметры (табл.13):

Таблица 13

№ сеч.	$\alpha_{0\kappa}$	$\alpha_{13\phi}$	t	β	\bar{t}	ω_1	γ	ω_2	δ
I-I	$69^{\circ}30'$	$21^{\circ}12'$	40,74	54	0,755	21°	42°	5°	$9^{\circ}30'$
II-II	74°	$21^{\circ}15'$	33,85	48,45	0,699	19°	43°	5°	8°
III-III	$75^{\circ}30'$	$21^{\circ}20'$	27	42,9	0,631	$17^{\circ}30'$	44°	5°	6°

В аэродинамическом отношении лопатку считаем спрофилированной.

§ 17. Пример профилирования рабочей лопатки

В качестве примера спрофилируем рабочую лопатку I ступени турбины низкого давления (НД), основной расчет которой дан в методическом пособии [20].

По материалам этого пособия имеем расчетный тракт проектируемого венца, а также зависимости (рис.50) углов потока:

Curve	δ	α	β
I,	10°	$21'45''$	
II,	7°	$21''$	
III,	6°	$20'20''$	78°
IV,	5°	$21'20''$	$75'30''$

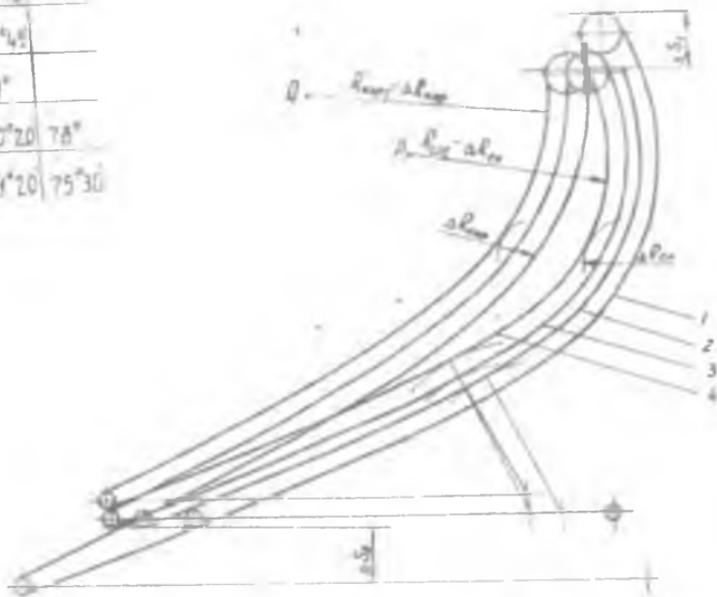


FIG. 48.

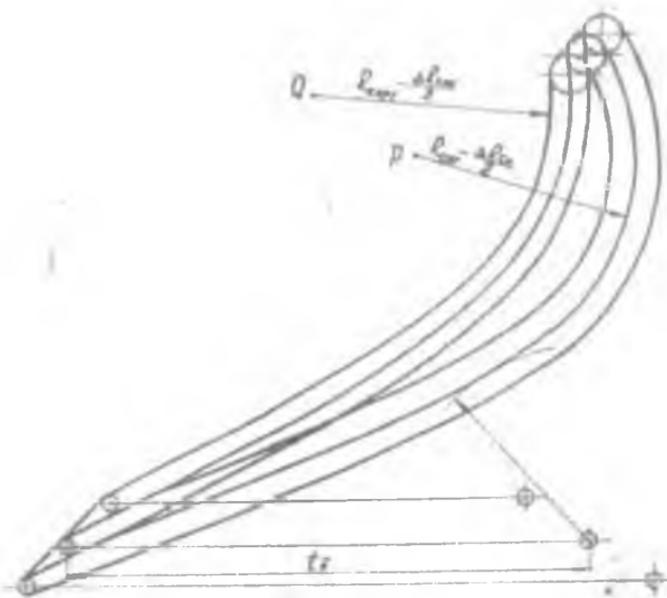


FIG. 49.

$$\beta_1 = f(R) \quad \text{и} \quad \beta_2 = f(R)$$

и адиабатической скорости на выходе $\lambda_{2ад}(R)$.

На рис. 51 представлены зависимости от радиуса значений скоростей и статического давления перед рабочим венцом, а также скорости - за ним.

Давление за венцом: $p_2 = 1,886 \text{ кг/см}^2$.

По данным [20] принимаем заданными:

коэффициент скорости $\psi_{ср} = 0,9761 = \text{const}$,

расход газа $G_r = 46,5 \text{ кг/сек}$,

температура в относительном движении $T_w^* = 915^\circ\text{К}$,

обороты ротора НД $n = 4530 \text{ об/мин}$.

Проектируемая лопатка должна иметь бандажную полку.

Ориентировочное число лопаток $Z_{р.к.} = 95$.

I. Выбор конструктивных углов $\beta_{1к}$ и $\beta_{2к}$

По рекомендациям § 2

$$\beta_{1к} = \beta_1 - (2 \div 3)^\circ$$

Определим величины $\lambda_{2ад}^{\text{пред}}$ по формуле (5) в пяти расчетных сечениях ступени и сравним их с соответствующими значениями $\lambda_{2ад}$. (Необходимые значения углов β_2 снимаем с рис. 50)

$$\lambda_{2адД_п}^{\text{пред}} = 1,01 \cdot \frac{\cos(\beta_2 + 8^\circ)}{\cos \beta_2} = 1,01 \cdot \frac{\cos(27^\circ 48' + 8^\circ)}{\cos 27^\circ 48'} = 0,9275;$$

$$\lambda_{2адД''}^{\text{пред}} = 1,01 \cdot \frac{\cos(30^\circ 27' + 8^\circ)}{\cos 30^\circ 27'} = 0,92;$$

$$\lambda_{2адД_{ср}}^{\text{пред}} = 1,01 \cdot \frac{\cos(32^\circ 51' + 8^\circ)}{\cos 32^\circ 51'} = 0,911; \quad \lambda_{2адД'}^{\text{пред}} = 1,01 \cdot \frac{\cos(35^\circ 32' + 8^\circ)}{\cos 35^\circ 32'} = 0,901;$$

$$\lambda_{2адД_к}^{\text{пред}} = 1,01 \cdot \frac{\cos(38^\circ 04' + 8^\circ)}{\cos 38^\circ 04'} = 0,89.$$

Вычисления показали, что во всех расчетных сечениях $\lambda_{2ад}^{\text{пред}}$ больше соответствующего значения $\lambda_{2ад}$, поэтому для определения угла $\beta_{2эф}$ воспользуемся зависимостью $\Delta\beta^\circ = f(\lambda_{2ад})$, приведенной в приложении I

$$\beta_2 - \Delta\beta_2 = \beta_{2эф} = \beta_{2к}.$$

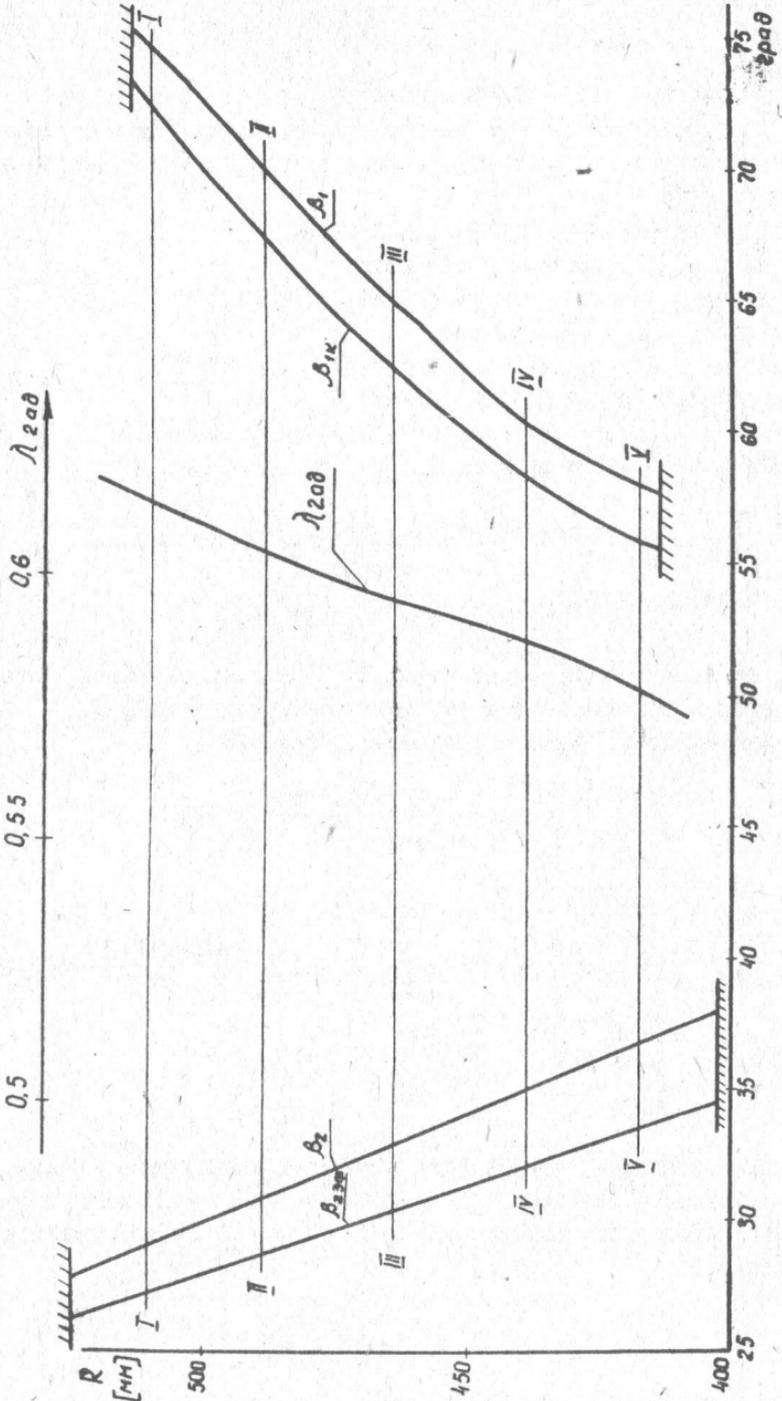
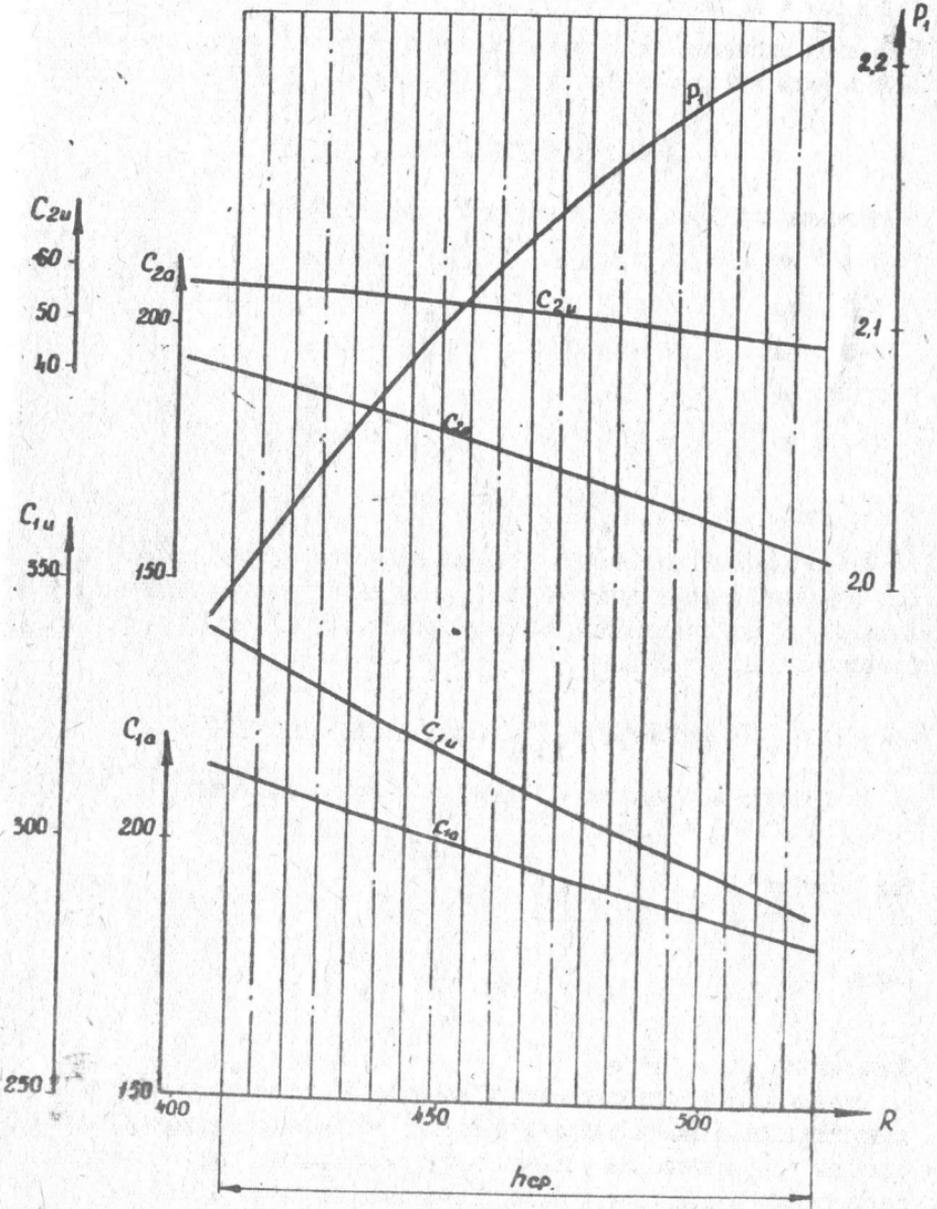


Рис. 50.



В указанных сечениях $\beta_{2\text{эф}}$ составляют:

$$\begin{aligned}\beta_{2\text{эф}D_{II}} &= 27^{\circ}16', & \beta_{2\text{эф}D_{IV}} &= 28^{\circ}46', & \beta_{2\text{эф}D_{CP}} &= 30^{\circ}16', \\ \beta_{2\text{эф}D'} &= 32^{\circ}06', & \beta_{2\text{эф}D_K} &= 33^{\circ}30'.\end{aligned}$$

Выбранные значения β_{1K} и вычисленные значения $\beta_{2\text{эф}}$ представлены в виде зависимостей $\beta_{1K} = f(R)$ и $\beta_{2\text{эф}} = f(R)$ на рис.50.

2. Назначение контрольных сечений

Назначаем 5 контрольных сечений (рис.52,б)

I-I	на	$R_I = 513,5$ мм	($D_I = 1027$ мм)
II-II	на	$R_{II} = 488,5$ мм	($D_{II} = 977$ мм)
III-III	на	$R_{III} = 463,5$ мм	($D_{III} = 927$ мм)
IV-IV	на	$R_{IV} = 438,5$ мм	($D_{IV} = 877$ мм)
V-V	на	$R_V = 413,5$ мм	($D_V = 827$ мм)

3. Выбор числа лопаток

Число лопаток может быть оценено либо по рекомендациям § 12 (по заданной ширине венца s и t_{opt}), либо принято равным значению $Z_{p.k.}$, уже оцененному в проекторочном расчете.

Принимаем $Z_{p.k.} = 95$.

4. Проектирование периферийного сечения

По графику в приложении 5 для периферийного сечения ($\beta_{II} = 74^{\circ}48'$, $\beta_{2I} = 29^{\circ}04'$) находим: $\bar{t}_{\text{opt}} = 0,737$.

Шаг разметки

$$t = \frac{\pi D_I}{Z_{p.k.}} = \frac{\pi \cdot 1027}{95} = 34 \text{ мм}.$$

Хорда

$$\beta = \frac{t}{\bar{t}_{\text{opt}}} = \frac{33,75}{0,737} = 45,8 \text{ мм}.$$

Принимаем $Z_2 = 0,4$ мм.

Оценим площадь периферийного сечения. Так как проектируемая лопатка должна иметь бандажную полку, то площадь периферийного сечения определится из условия допустимых напряжений от центральных сил. Эти напряжения ограничиваем величиной 10 кг/мм^2 .

(учитываем требования вибропрочности). Тогда площадь периферийного сечения (33)

$$f_{\Gamma} = \frac{P_{\Pi}}{[\sigma]} = \frac{\gamma}{g} \omega^2 R_{\Pi} \cdot V_{\Pi}$$

где P_{Π} - центробежная сила полки;

R_{Π} - средний радиус полки;

V_{Π} - объем полки;

$[\sigma]$ - 10 кг/мм².

Для определения объема необходимы размеры полки в плане и средняя толщина ее, определяемая по допустимым напряжениям изгиба консоли полки под действием центробежной силы.

Размер «А» (рис.52,а):

$$A = \frac{2\pi R_{\Pi}}{2 \text{ р.к.}} = \frac{2\pi \cdot 522,5}{95} = 34,4 \text{ мм}$$

Размер «В» (рис.52,а) определяется из тракта турбины:

$$B = B' + 1 \text{ мм} = 31,5 + 1 = 32,5 \text{ мм}$$

Напряжения изгиба σ для проектировочного расчета принимаем равными 70 кг/мм².

Толщина полки:

$$h = \frac{\gamma \cdot \omega^2 \cdot R_{\Pi} \cdot B^2 A^2}{(A^2 + B^2) \cdot g \cdot \sigma} = \frac{8,2 \cdot 10^{-6} (\pi \cdot 4530)^2 \cdot 522,5 \cdot 34,4^2 \cdot 32,5^2}{9810 \cdot 30^2 (34,4^2 + 32,5^2) \cdot 70} \approx 1 \text{ мм}$$

Объем полки

$$V_{\Pi} = A \cdot B \cdot h = 34,4 \cdot 32,5 \cdot 1 = 1120 \text{ мм}^3$$

Площадь периферийного сечения

$$f_{\Gamma} = \frac{8,2 \cdot 10^{-6} (\pi \cdot 4530)^2 \cdot 522,5 \cdot 1120}{9810 \cdot 30^2 \cdot 10} = 11 \text{ мм}^2$$

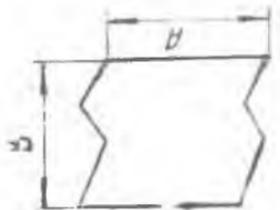
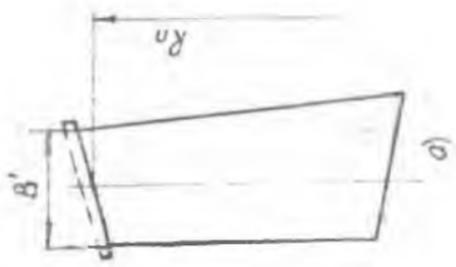
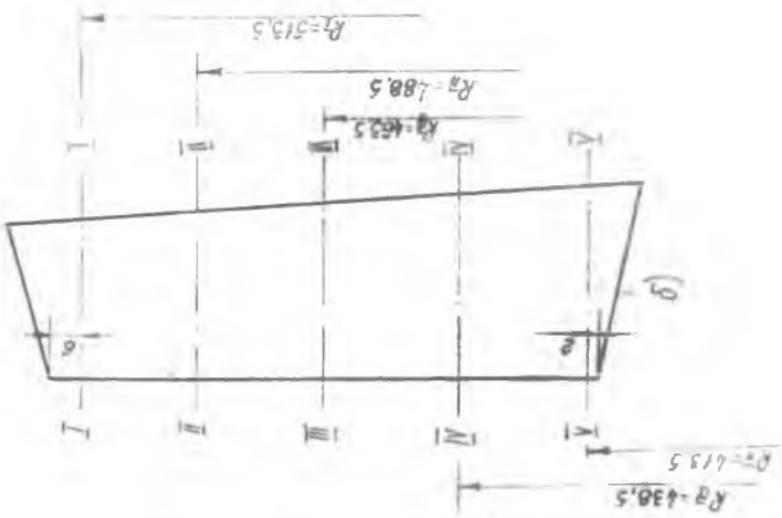
Этому значению площади соответствует толщина профиля, оцененная по (10')

$$d_m = \frac{f}{0,776} = 2,0 \text{ мм} \quad (\bar{d}_m = 0,044)$$

Определяем «горло» канала:

$$\frac{a_2}{t} = \sin \beta_{2\text{эфI}}; \quad \sin \beta_{2\text{эфI}} = 0,4582 \quad (\beta_{2\text{эфI}} = 27^\circ 16');$$

$$a_2 = \sin \beta_{2\text{эфI}} \cdot t = 0,4582 = 15,6 \text{ мм}$$



Угол "δ" не ограничиваем, так как λ_{2,до} < 1, но при построении профиля будем соблюдать неравенство (15).

Угол изгиба профиля Θ_к = 180° - (72°36' + 27°16') = 80°08'.

По графику в приложении 2 находим:

X_p = 0,202; X_{dm} = 0,245.

Определим τ₁:

τ₁/β = 0,1469 · τ₂/β + 0,00205K_к + 0,1866d_m - 0,0004,

где

K_к = sinβ_{1к} / sinβ_{2к} = 0,9542 / 0,4582 = 2,082,

τ₁ = 45,8 (0,1469 · 0,4 / 45,8 + 0,00205 · 2,082 + 0,1866 · 0,044 - 0,0004) = 0,609.

Принимаем τ₁ = 0,6 мм.

Определим углы ω₁ и ω₂.

ω₁ = 3,79 arctg τ_m - τ₁ / (X_{dm} · L_p); ω₂ = 1,995 arctg τ_m - τ₂ / ((1 - X_{dm}) · L_p)

Имеем

τ₁ + τ₂ = (0,6 + 0,4) / 45,8 = 0,022.

По графику в приложении 3 по известной сумме τ₁ + τ₂ и углу Θ_к = 80° определяем величину L_p/β:

L_p/β = 1,084, L_p = (L_p/β) · β = 1,084 · 45,8 = 49,6 мм.

Получаем:

ω₁ = 3,79 arctg (1 - 0,6) / (0,245 · 49,6) = 7°,

ω₂ = 1,995 arctg (1 - 0,4) / (0,755 · 49,6) = 2°.

Находим еще ряд величин, необходимых для построения профиля:

a₂ + τ₂ = 15,45 + 0,4 = 15,85 мм;

√d_m / K_к² = √0,044 / 2,082² = 0,0484;

β_{1к} - β_{2к} = 72°36' - 27°36' = 42°20'.

По семейству кривых 2 приложения 4 производим оценку :

$$\gamma = 46^{\circ}30'.$$

Желая выдержать величину осевых зазоров, принятых в 20, стремимся к $S_I \rightarrow B' = 31,5$ мм. При этом

$$\gamma = \arcsin \frac{S_I - (\tau_{1I} + \tau_{2I})}{b_I - (\tau_{1I} + \tau_{2I})};$$

$$\gamma = \arcsin \frac{31 - (0,61 + 0,4)}{45,8 - (0,61 + 0,4)} = 43^{\circ}$$

Видим, что потребное значение γ , при котором $S_I \approx 31,5$ мм отличается от расчетного. При расчетном значении γ

$$S_I = b_I \cdot \sin \gamma_I = 45,8 \cdot 0,725 = 33,2 \text{ мм}.$$

Считаем такое увеличение S допустимым, но при профилировании будем стремиться уменьшить S_I .

Определяем:

$$\beta_{2cp} = \beta_{2k}^{\dagger} = \frac{-\omega_2}{2} = 27^{\circ}16' - 1^{\circ} = 26^{\circ}16';$$

$$\beta_{2kop} = 27^{\circ}16' + 1^{\circ} = 28^{\circ}16';$$

$$\beta_{1cp} = \beta_{1k} - \frac{\omega_1}{2} = 72^{\circ}36' - 3^{\circ}30' = 69^{\circ}06';$$

$$\beta_{1kop} = 72^{\circ}36' + 3^{\circ}30' = 76^{\circ}06'.$$

В соответствии с рекомендациями § 4 строим профиль периферийного сечения в масштабе 10:1 (рис.53).

Его некоторые геометрические характеристики:

$$\beta_{1k} = 72^{\circ}36', \quad \beta_{2k} = 27^{\circ}16', \quad \tau_I = 0,6, \quad \tau_2 = 0,4, \quad \omega = 7^{\circ}30',$$

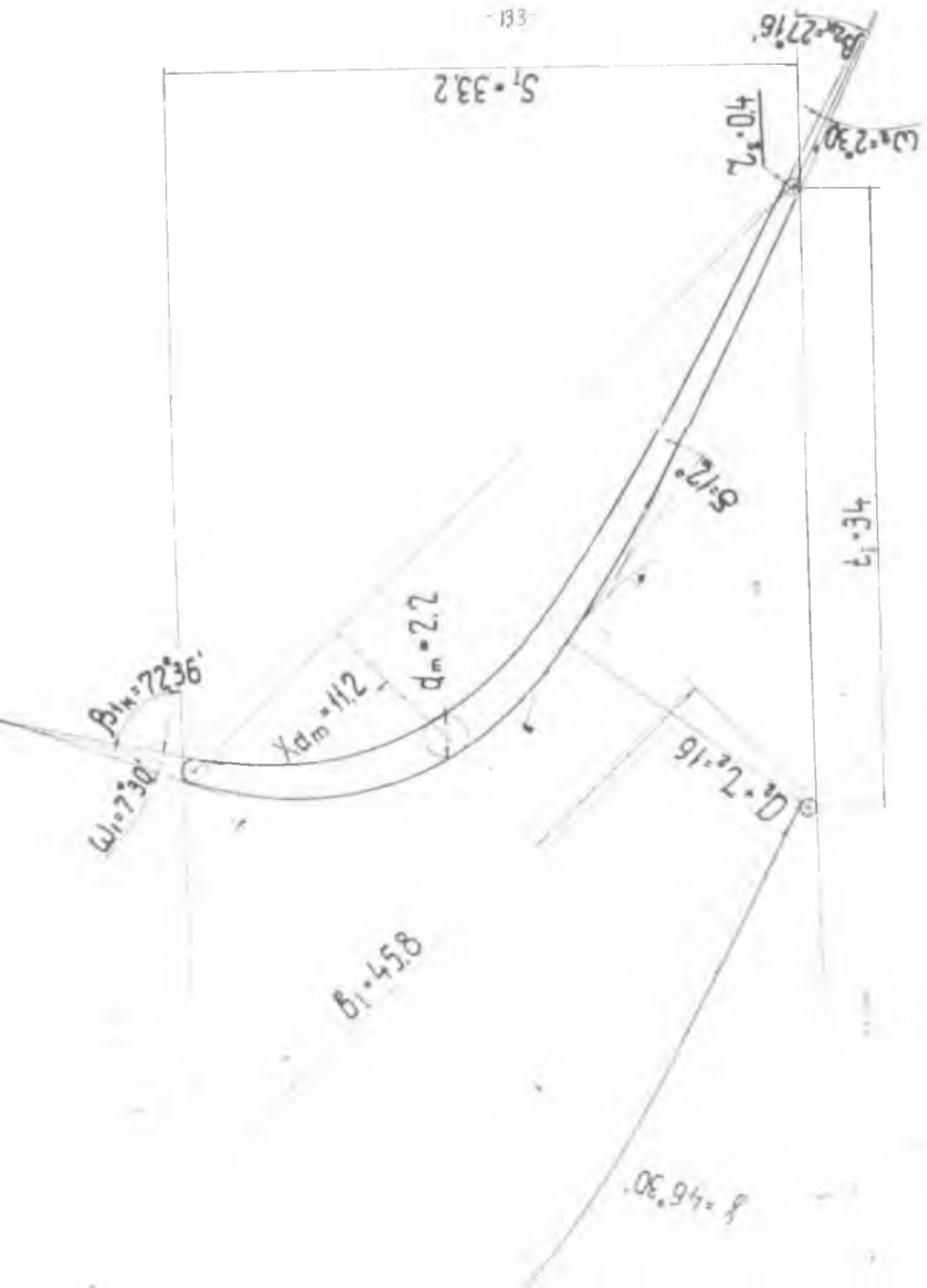
$$\omega_2 = 2^{\circ}30', \quad \bar{X}_{dm} = 0,244, \quad d_m = 2,2, \quad \gamma = 46^{\circ}30'.$$

Определяем с помощью сетки площадь f_I и положение центра тяжести профиля.

Расчеты сведены в таблицу I4.

$$f_I = 74,8 \text{ мм}.$$

(Фактическая ширина сечения лопатки на периферии оказывается несколько большей оцененного значения ширины полки B . При более тщательном профилировании размеры полки и её объем пересчитываются заново).



Расчетный лист определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля														Объект ДЛ									
														Сечение № I-I									
		Ось OX ₁						Ось OY ₁						Ось OY ₂									
N°	K ₁	K ₂	B ₀	B ₁	B ₂ -B ₁	K(B ₀ ·B ₁)	B ₀ ·B ₁	K(B ₁ ·B ₂)	B ₁ ·B ₂	K(B ₀ ·B ₂)	B ₀ ·B ₂	B ₀	B ₁	B ₂	B ₀ ·B ₁	B ₁ ·B ₂	K(B ₀ ·B ₂)	B ₀ ·B ₂	K(B ₀ ·B ₁)	B ₁ ·B ₂			
1	0.5	0.33	10.8	8.3	2.5	1.25	18.1					1.8	1.8	0	0	3.6			2.2	1.9	0.3	0.15	4.1
2	1.5	2.33	16	6.9	9.1	13.65	22.9					1.95	1.8	0.15	0.225	3.75			2.5	1.75	0.75	1.12	4.25
3	2.5	6.33	10.15	6.05	4.7	11.45	16.80					2.0	1.55	0.45	1.125	3.55			3.15	1.65	1.7	4.26	5.00
4	3.5	12.33	0.73	5.45	-1.72	-16.5	6.18					2.1	1.45	0.65	2.28	3.55			6.2	1.5	4.7	16.45	7.7
5	4.5	20.33		4.75	-4.75	-21.4	4.75					2.3	1.4	0.9	4.05	3.7			6.47	1.45	5.02	22.6	7.92
6	5.5	30.33		4.3	-4.3	-23.5	4.3					2.3	1.3	1.0	5.5	3.6				1.3	-1.3	-2.15	
7	6.5	42.5		2.42	-2.42	-13.8	2.42					2.4	1.3	1.1	7.15	3.7				1.25	-1.26	-8.13	
8	7.8	56.3										2.45	1.2	1.25	9.38	3.65				1.2	-1.2	-9.0	
9	8.5	72.3										2.3	1.15	1.45	9.78	3.45				1.1	-1.1	-8.25	
10	9.5	90.3										0.08	1.1	-1.02	-3.7	1.18				1.05	-1.05	-9.98	
11	10.5	110.3											1.05	-1.05	-1.1	1.05				0.95	0.95	-9.98	
12	11.5	132.3											1.0	-1.0	-1.15	1.0				0.9	-0.9	-10.48	
13	12.5	156.3											0.9	-0.9	-1.25	0.9				0.03	-0.03	-0.375	
14	13.5	182.3											0.7	-0.7	-9.45	0.7							
15	14.5	210.3																					
16	18.5	240.3																					
17	16.5	272.3																					
18	17.5	306.3																					
19	18.5	342.3																					
20	19.5	380.3																					

$\sum B_0 B_1 = 76.15$
 $\sum B_1 B_2 = 7.1$
 $\sum B_0 B_2 = 70.1$

$\sum K(B_0 B_1) = -13.44$
 $\sum K(B_1 B_2) = 33.38$
 $\sum K(B_0 B_2) = 53.86$
 $\sum B_0 B_1 = 76.15$
 $\sum B_1 B_2 = 7.1$
 $\sum B_0 B_2 = 70.1$

$\sum B_0 B_1 = 76.15$
 $\sum B_1 B_2 = 36.75$
 $\sum B_0 B_2 = 75$
 $\sum K(B_0 B_1) = -7.5$
 $\sum K(B_1 B_2) = 23.3$
 $\sum K(B_0 B_2) = 10.2$

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3} = \frac{76.15 + 74.75 + 73.5}{3} = 74.8 \text{ мм}$$

$$y_{C_0} = \frac{\sum M_{Ox_1}}{f} = \frac{-48.65}{74.8} = -0.65 \text{ мм}$$

$$x_{C_0} = \frac{\sum M_{Oy_1}}{f} = \frac{-53.64}{74.8} = -0.717 \text{ мм}$$

$$J_{C_1 x_1} = J_{Ox_1} - f \cdot y_{C_0}^2 = \text{мм}^4$$

$$J_{C_1 y_1} = J_{Oy_1} - f \cdot x_{C_0}^2 = \text{мм}^4$$

$$A = J_{C_1 x_1} + J_{C_1 y_1} = \text{мм}^4$$

$$B = J_{C_1 x_1} - J_{C_1 y_1} = \text{мм}^4$$

$$x_{C_2} = \frac{\sum M_{Oy_2}}{f} = \frac{75}{74.8} = -1.005 \text{ мм}$$

$$J_{C_2 x_2} = J_{Oy_2} - f \cdot x_{C_2}^2 = \text{мм}^4$$

$$J_{C_2 x_2} = A - J_{C_1 y_1} = \text{мм}^4$$

$$C = J_{C_1 y_1} - J_{C_2 x_2} = \text{мм}^4$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = \text{мм}^4$$

$$J_y = \text{мм}^4$$

$$J_x = A - J_y = \text{мм}^4$$

$$J_x = \text{мм}^4$$

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_x}$$

$$2\alpha =$$

$$\alpha =$$

5. Определение площадей корневого и промежуточных сечений

В соответствии с рекомендациями § 13 выбираем линейный закон изменения площадей поперечных сечений по высоте лопатки (рис.54).

Оценим площадь корневого сечения, исходя из потребной по напряжениям растяжения.

Пусть коэффициент сужения $\chi = \frac{f_I}{f_V} = 0,45$. Предполагаем, что максимальные напряжения растяжения будут в корневом сечении. Определим их [17]:

$$\sigma_{\max} = \psi \cdot \sigma_0,$$

где

$$\psi = \frac{1 + \chi}{2} - \frac{1 - \chi}{6\lambda},$$

$$\lambda = \frac{D_{\text{св}}}{R - z_0}, \quad \sigma = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (R^2 - z_0^2),$$

$$\lambda = \frac{927}{513,5 - 413,5} = 9,27, \quad \psi = \frac{1 + 0,45}{2} - \frac{1 - 0,45}{6 \cdot 9,27} = 0,708,$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} \cdot 0,837 \cdot 10^{-9} \cdot 4,75^2 (513,5^2 - 413,5^2) = 8,8 \text{ кг/мм}^2.$$

Получаем

$$\sigma_{\max} = 0,708 \cdot 8,8 = 7,75 \text{ кг/мм}^2.$$

Оценим коэффициент запаса прочности по напряжениям растяжения. В [20] выбран материал лопаток ИС-6К. Из-за больших коэффициентов запаса прочности возьмем материал с худшими прочностными характеристиками - ЭИ-437Б, но более дешевый.

При температуре $t = 740^\circ\text{C}$ предел длительной прочности ЭИ-437Б

$$\sigma_{2000}^t = 20 \text{ кг/мм}^2.$$

Тогда запас прочности $K = \frac{\sigma_{\text{в.т}}^t}{\sigma_{\max}} = \frac{20}{7,75} = 2,58$,

что лежит в допустимых пределах.

Таким образом, площади сечений должны составлять:

$$f_V = \frac{f_I}{\chi} = \frac{74,8}{0,45} = 166 \text{ мм}^2;$$

$$f_{IV} = 143 \text{ мм}^2; \quad f_{III} = 120 \text{ мм}^2; \quad f_{II} = 97 \text{ мм}^2.$$

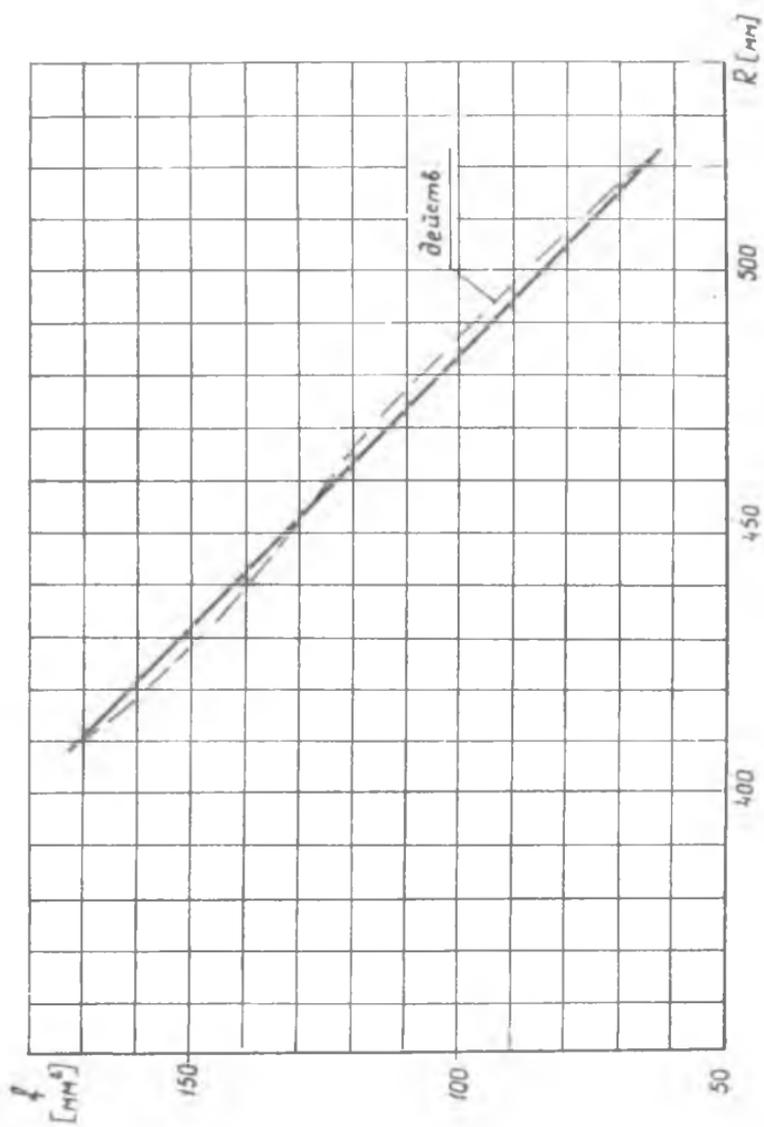


Рис. 54.

6. Проектирование корневого сечения

Для сечения У-У выполняем подготовительные работы, как и для сечения I-I.

Для проектирования этого профиля являются заданными значения:

$$\beta_{1к} = 55^{\circ}48', \quad \beta_{2зф} = 33^{\circ}30', \quad f_{\bar{y}} = 166 \text{ мм}^2.$$

Подсчитаем: шаг решетки

$$t_{\bar{y}} = \frac{\pi D_{\bar{y}}}{z} = \frac{\pi \cdot 827}{95} = 27.4 \text{ мм},$$

хорду профиля

$$b_{\bar{y}} = \frac{t}{(t/b)_{\text{opt}}} = \frac{27.5}{0.715} = 38.5 \text{ мм}.$$

Значение $(t/b)_{\text{opt}} = 0.715$ нашли по графику в приложении 5 для

$$\beta_{1\bar{y}} = 57^{\circ}56' \quad \text{и} \quad \beta_{2\bar{y}} = 36^{\circ}48'.$$

Оценим толщину профиля d_m .

Зададимся $\tau_2 = 0.6 \text{ мм}$. По графику приложения 2 находим:

$$X_p = 0.366, \quad \bar{X}_{d_m} = 0.27.$$

Угол поворота потока

$$\theta = 180^{\circ} - (57^{\circ}56' + 36^{\circ}48') = 85^{\circ}16'.$$

Определим τ_1 :

$$\frac{\tau_1}{\theta} = 1.89 \frac{\tau_2}{\theta} - 0.00204 K_K + 0.0138$$

$$K_K = \frac{\sin 55^{\circ}48'}{\sin 33^{\circ}30'} = 1.5.$$

$$\frac{\tau_1}{\theta} = 1.89 \frac{0.6}{38.5} - 0.00204 \cdot 1.5 + 0.0138 = 0.0126,$$

$$\tau_1 = 0.0126 \cdot 38.5 = 1.5 \text{ мм},$$

$$\tau_1 = 1.5 \text{ мм}.$$

Максимальная толщина

$$d_m = 2 \left[\frac{f}{1.055 L_p} - \bar{X}_{d_m} \cdot \tau_1 - (1 - \bar{X}_{d_m}) \tau_2 \right].$$

$$\bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2 = \frac{1.5 + 0.6}{38.5} = 0.0546.$$

По графику приложения 3 определяем

$$\frac{L_p}{\delta} = 1,092; \quad L_p = 1,092 \cdot 38,5 = 42 \text{ мм},$$

тогда

$$d_m = 2 \left[\frac{166}{1,066 \cdot 42} - 0,27 \cdot 1,5 - 0,73 \cdot 0,6 \right] = 5,79 \text{ мм}.$$

По полученным данным строим профиль корневого сечения. Построенный вариант имеет диффузорность больше допустимой. Для уменьшения диффузорности, изменяем радиус входной кромки (уменьшаем).

Поступим следующим образом.

Пусть $\bar{d}_m = 0,11$.

Тогда

$$d_m = \bar{d}_m \cdot \delta = 0,11 \cdot 38,5 = 4,2 \text{ мм}.$$

Определяем "горло" канала:

$$a_2 = \sin \beta_{2\text{эфв}} \cdot t_v = 0,552 \cdot 27,4 = 15,18 \text{ мм}.$$

Как и для периферийного сечения, угол δ не ограничиваем. Угол поворота потока

$$\theta = 180^\circ - (57^\circ 56' + 36^\circ 48') = 85^\circ 16'.$$

По графику в приложении 2 находим

$$\bar{X}_p = 0,366; \quad \bar{X}_{d_m} = 0,27.$$

Определим τ_1 :

$$\tau_1 = 38,5 \cdot (0,1469 \frac{0,6}{38,5} + 0,00205 \cdot 1,5 + 0,1866 \cdot 0,11 - 0,0004) = 0,928$$

$$(K_k = \frac{\sin 55^\circ 48'}{\sin 33^\circ 30'} = 1,5).$$

Принимаем $\tau_1 = 1,0 \text{ мм}$.

Определим углы ω_1 и ω_2 .

$$\bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2 = \frac{1 + 0,6}{38,5} = 0,0416;$$

$$\frac{L_p}{\delta} = 1,0945; \quad L_p = 1,0945 \cdot 38,5 = 42,15 \text{ мм}.$$

Теперь

$$\omega_1 = 3,79 \text{ arc tg } \frac{2,1 - 1,0}{0,27 \cdot 42,15} = 21^\circ,$$

$$\omega_2 = 1,995 \arctg \frac{2,1-0,6}{0,73 \cdot 42,15} = 5,34^\circ.$$

Находим еще ряд величин:

$$a_2 + z_2 = 15,18 + 0,6 = 15,78 \text{ мм};$$

$$\frac{\sqrt{d_m}}{K_k} = \frac{\sqrt{0,11}}{1,5^2} = 0,1473; \quad \gamma = 59^\circ;$$

$$\beta_{1\text{сн}} = 55^\circ 48' - \frac{21'}{2} = 45^\circ 18'; \quad \beta_{1\text{кор}} = 55^\circ 48' + \frac{21'}{2} = 66^\circ 18';$$

$$\beta_{2\text{сн}} = 33^\circ 30' - \frac{5,34'}{2} = 30^\circ 43';$$

$$\beta_{2\text{кор}} = 33^\circ 30' + \frac{5,34'}{2} = 36^\circ 17'$$

Приступаем к графическому оформлению профиля. Построенный вариант профиля имеет $s_y = 33,3$, вместо расчетного $s_y = 39$. Корректируем этот профиль, изменяя t .

$$\text{Пусть } \bar{t} = 0,9 t_{\text{opt}} = 0,9 \cdot 0,715 = 0,644.$$

Тогда

$$b_x = \frac{t}{\bar{t}} = \frac{27,4}{0,644} = 42,7 \text{ мм},$$

$$\bar{d}_m = d \cdot b = 0,11 \cdot 42,7 = 4,7 \text{ мм},$$

$$z_2 = 0,6; \quad \theta = 85^\circ 16';$$

$$a_2 = 15,18 \text{ мм}; \quad \bar{X}_p = 0,366; \quad \bar{X}_{d_m} = 0,27;$$

$$z_1 = 42,7 \left(0,1469 \cdot \frac{0,6}{42,7} + 0,00205 \cdot 1,5 + 0,1866 \cdot 0,11 - 0,0004 \right) = 1,08 \text{ мм};$$

$$z_1 = 1,1 \text{ мм}; \quad \bar{z}_1 + \bar{z}_2 = \frac{1,1 + 0,6}{42,7} = 0,0398;$$

$$\bar{L}_p = 1,095; \quad L_p = 46,75 \text{ мм};$$

$$\omega_1 = 3,79 \arctg \frac{2,35 - 1,1}{0,27 \cdot 46,75} = 21^\circ 24';$$

$$\omega_2 = 1,995 \arctg \frac{2,35 - 0,6}{0,73 \cdot 46,75} = 5^\circ 52'; \quad a_2 + z_2 = 15,78;$$

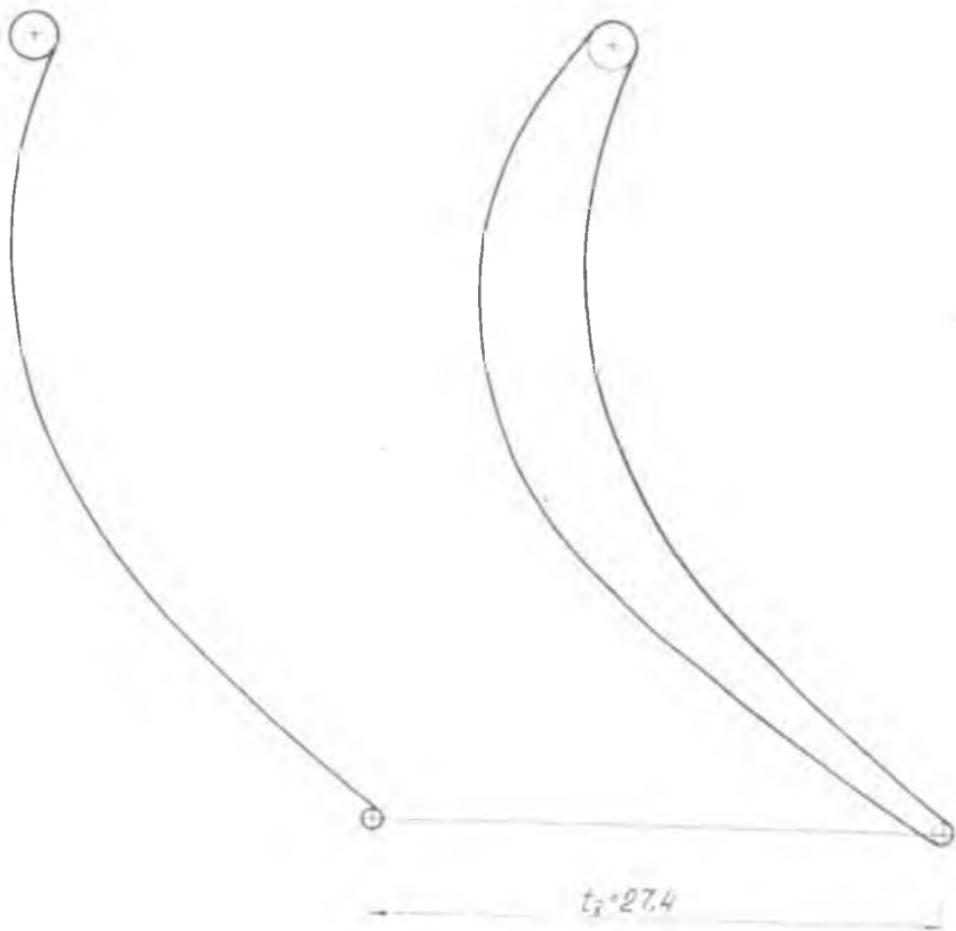
$$\beta_{1\text{сн}} = 55^\circ 48' - \frac{21^\circ 24'}{2} = 45^\circ 06'; \quad \beta_{1\text{кор}} = 66^\circ 30';$$

$$\beta_{2\text{сн}} = 33^\circ 30' - \frac{5^\circ 52'}{2} = 30^\circ 34'; \quad \beta_{2\text{кор}} = 36^\circ 26'.$$

Строим этот профиль (рис.55). Междоузельный канал профиля

имеет

$$\bar{D} = \frac{22,6}{22} = 1,02.$$



что лежит в допустимых пределах (§ 5).

Заполнением расчетного листа (табл.15) находим геометрические характеристики постробленного профиля и положение его центра тяжести.

Постробленный профиль имеет:

$$\beta_{1к} = 59^{\circ}30', \quad \beta_{2к} = 36^{\circ}, \quad z_1 = 1,1, \quad z_2 = 0,6, \quad \omega_1 = 20^{\circ}30', \\ \omega_2 = 5^{\circ}, \quad \bar{X}_{d_m} = 0,31, \quad d_m = 5,1, \quad \gamma = 65^{\circ}30'$$

7. Определение коэффициента запаса прочности по максимальным напряжениям растяжения. Определение выносов

Для определения максимальных напряжений растяжения от центробежных сил делим лопатку одиннадцатью сечениями на 10^{*}) участков. Длина каждого участка (рис.51):

$$\Delta R = \frac{h_{ср}}{10} = \frac{112}{10} = 11,2 \text{ мм}$$

По формуле (35) определим центробежную силу каждого из участков (см.таблицу 16). При этом значения площадей $f_{i ср}$ и радиусов $R_{i ср}$ снимаем непосредственно с рис.54.

Данные для расчета:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 4530}{60} = 475 \text{ сек}^{-1}$$

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{8,2 \cdot 10^{-6}}{9810} = \frac{0,836}{109} \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{мм}^4} \right]$$

$$\Delta R \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \omega^2 = 11,2 \cdot 0,836 \cdot 10^{-9} \cdot 475^2 = 0,211 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{кг}}{\text{мм}^3} \right]$$

Центробежная сила полки:

$$P_{п} = \frac{\gamma}{g} \cdot \omega^2 \cdot R_{п} \cdot V_{п} = 0,01883 \cdot 10^{-2} \cdot 522,5 \cdot 1120 = 110,4 \text{ кг}$$

По максимальным напряжениям растяжения, действующим в сечении «10», определим коэффициент запаса прочности:

$$K = \frac{\sigma_{в.т}}{\sigma_{max}} = \frac{20}{7,23} = 2,77$$

^{*}) Максимальные напряжения можно было найти более простым способом, но примененный метод позволяет в дальнейшем просто определить выносы.

Таблица 15

Расчетный лист

Объект Д А

определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля

Сечение № 1 - 7

№	K ₁	K ₂	Ось OY ₁						Ось OY ₂												
			δ ₀	δ ₁	δ ₂ -δ ₁	δ ₁ ·δ ₂	δ ₁ ·δ ₀	δ ₂ ·δ ₀	δ ₀	δ ₁	δ ₂ -δ ₁	δ ₁ ·δ ₂	δ ₁ ·δ ₀	δ ₂ ·δ ₀							
1	0,5	0,33	24,65	17,55	9	4,95	4,57	14,25	5,00	4,85	0,15	0,075	9,85	3,25	6,4	5,4	1,2	0,65	42,1	3,98	
2	1,5	2,52	22,8	14,88	7,92	3,96	30,2	5,25	4,5	0,75	1,125	9,75	2,27	8,4	4,55	3,85	5,73	12,95	30,2		
3	2,5	5,33	19,3	12,55	6,27	3,13	20,5	30,4	19,2	5,4	4,15	1,25	3,12	9,55	80,5	13,6	3,35	6,65	24,1	17,45	140,5
4	3,5	12,33	14,9	9,95	5,55	2,77	16,42	24,25	30,0	5,5	3,8	1,7	5,89	9,3	11,5	16,5	3,25	13,25	46,4	19,75	244
5	4,5	20,33	9,0	6,05	3,05	1,52	15,05	34,4	5,55	5,45	2,1	9,45	9,0	18,3	2,9	2,8	12,6	3,6	17,5		
6	5,5	30,33	4,1	2,75	1,37	0,68	13,74	20,4	5,55	3,1	2,45	13,5	8,65	26,2	3,55	2,55	13,9	2,55	17,2		
7	6,5	42,33	1,1	0,75	0,37	0,18	12,42	24,4	5,55	2,8	2,55	16,6	8,15	34,6	2,2	2,2	16,3	2,2	18,6		
8	7,5	55,33	0,1	0,35	0,17	0,08	11,22	24,4	5,00	2,9	2,5	18,75	7,5	41,6	2,0	2,0	15,0	2,0	18,6		
9	8,5	70,33	0,1	0,15	0,07	0,03	10,05	24,4	2,14	2,25	0,11	-0,935	6,39	31,8	1,8	1,8	13,2	1,8	13,0		
10	9,5	87,33	0,1	0,05	0,02	0,01	8,92	24,4	2,00	2,00	-1,0	2,00	18,06	1,6	1,6	11,2	1,6	14,6			
11	10,5	106,33	0,1	0,02	0,01	0,00	7,83	24,4	1,8	1,8	-1,39	1,8	19,6	1,4	1,4	10,7	1,4	15,5			
12	11,5	127,33	0,1	0,01	0,00	0,00	6,78	24,4	1,6	1,6	-1,6	1,6	21,2	1,2	1,2	9,4	1,2	16,7			
13	12,5	150,33	0,1	0,00	0,00	0,00	5,77	24,4	1,4	1,4	-1,7	1,4	22,8	1,0	1,0	8,2	1,0	18,2			
14	13,5	175,33	0,1	0,00	0,00	0,00	4,79	24,4	1,2	1,2	-1,7	1,2	24,4	0,8	0,8	7,0	0,8	19,8			
15	14,5	202,33	0,1	0,00	0,00	0,00	3,84	24,4	1,0	1,0	-1,7	1,0	26,0	0,6	0,6	5,8	0,6	21,4			
16	15,5	231,33	0,1	0,00	0,00	0,00	2,91	24,4	0,8	0,8	-1,7	0,8	27,6	0,4	0,4	4,6	0,4	23,0			
17	16,5	262,33	0,1	0,00	0,00	0,00	2,01	24,4	0,6	0,6	-1,7	0,6	29,2	0,2	0,2	3,4	0,2	24,6			
18	17,5	305,33	0,1	0,00	0,00	0,00	1,13	24,4	0,4	0,4	-1,7	0,4	30,8	0,1	0,1	2,2	0,1	26,2			
19	18,5	360,33	0,1	0,00	0,00	0,00	0,27	24,4	0,2	0,2	-1,7	0,2	32,4	0,0	0,0	1,0	0,0	27,8			
20	19,5	427,33	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	24,4	0,0	0,0	-1,7	0,0	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,4			

Max ₁	f ₁	J _{Ox1}
12,78	165,28	1553,8

Max ₂	f ₂	J _{Ox2}
1,335	82,36	1553,8

Max ₃	f ₃	J _{Ox3}
-6,91	8,1	1553,8

$$f_3 = f_1 + f_2 + f_3 = 165,28 + 165,28 + 165,28 = 165,28 \text{ мм}^2$$

$$x_{C1} = \frac{\text{Max}_1}{f} = \frac{-32,78}{165,28} = -0,198 \text{ мм}$$

$$x_{C2} = \frac{\text{Max}_2}{f} = \frac{5,34}{165,28} = 0,0323 \text{ мм}$$

$$J_{Cx1} = J_{Ox1} - f \cdot x_{C1}^2 = 1554,01 \text{ мм}^4$$

$$J_{Cx2} = J_{Ox2} - f \cdot x_{C2}^2 = 19527,835 \text{ мм}^4$$

$$A = J_{Cx1} + J_{Cx2} = 21081,845 \text{ мм}^4$$

$$B = J_{Ox3} - J_{Cx3} = 17973,8 \text{ мм}^4$$

$$x_{C3} = \frac{\text{Max}_3}{f} = \frac{27,64}{165,28} = -0,167 \text{ мм}$$

$$J_{Cx3} = J_{Ox3} - f \cdot x_{C3}^2 = 10943,48 \text{ мм}^4$$

$$J_{Cx2} = A - J_{Cx3} = 10138 \text{ мм}^4$$

$$C = J_{Cx2} = J_{Cx2} = 805 \text{ мм}^4$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = 19528,0 \text{ мм}^4$$

$$J_y = 19528 \text{ мм}^4$$

$$J_x = A - J_y = 1553,8 \text{ мм}^4$$

$$J_x = 1553,8 \text{ мм}^4$$

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_x} = 0,9998$$

$$2\alpha = 1^\circ 12'$$

$$\alpha = 0^\circ 36'$$

Таблица 16

№ участ- ка	R_{cp}	f_i	$f_{i\,cp}$	$R_{cp} \cdot f_{cp}$	ΔP	P	σ_{max}
попка	522,5				110,4	110,4	
1	516,4	73,35	67,9	35100	74,1	184,5	2,516
2	505,2	84,25	78,8	39800	84,1	268,6	3,185
3	494,0	95,15	89,7	44400	93,8	362,4	3,806
4	482,8	106,05	100,6	48600	102,6	465,0	4,380
5	471,6	116,95	111,5	52600	111,0	576,0	4,930
6	460,4	127,85	122,4	56300	118,9	694,9	5,430
7	449,2	138,75	133,4	59900	126,5	821,4	5,910
8	438,0	149,65	144,2	63200	133,5	954,9	6,380
9	426,8	160,55	155,1	66250	139,9	1094,8	6,820
10	415,6	171,45	166	69000	145,7	1240,5	7,230

Значение $\sigma_{B,\tau}^t$ нашли по приложению 8 для материала ЭИ-437Б при температуре $t = 915 - 273 + 100 = 740^\circ\text{C}$.

Удовлетворившись таким запасом прочности, приступаем к определению выносов.

Расчет газовых сил в проекциях на оси A и U и значений выносов периферийного сечения относительно корневого выполнены по формулам § 13, п.2.

Расчет сведен в табл.17. Данные для расчета (C_{1a} ; C_{2a} ; C_{1u} ; C_{2u} и p_1) заимствуем из графиков рис.51. Значение p_2 на всех радиусах постоянно и равно $p_2 = 1,886 \text{ кг/см}^2$.

По результатам расчета имеем $a = 0,608 \text{ мм}$, $\beta = 0,71 \text{ мм}$.

Для проектирования примем расположение выносов промежуточных сечений по линейному закону.

Методом, описанным в § 13, п.4, совмещаем профили периферийного и корневого сечений (рис.56).

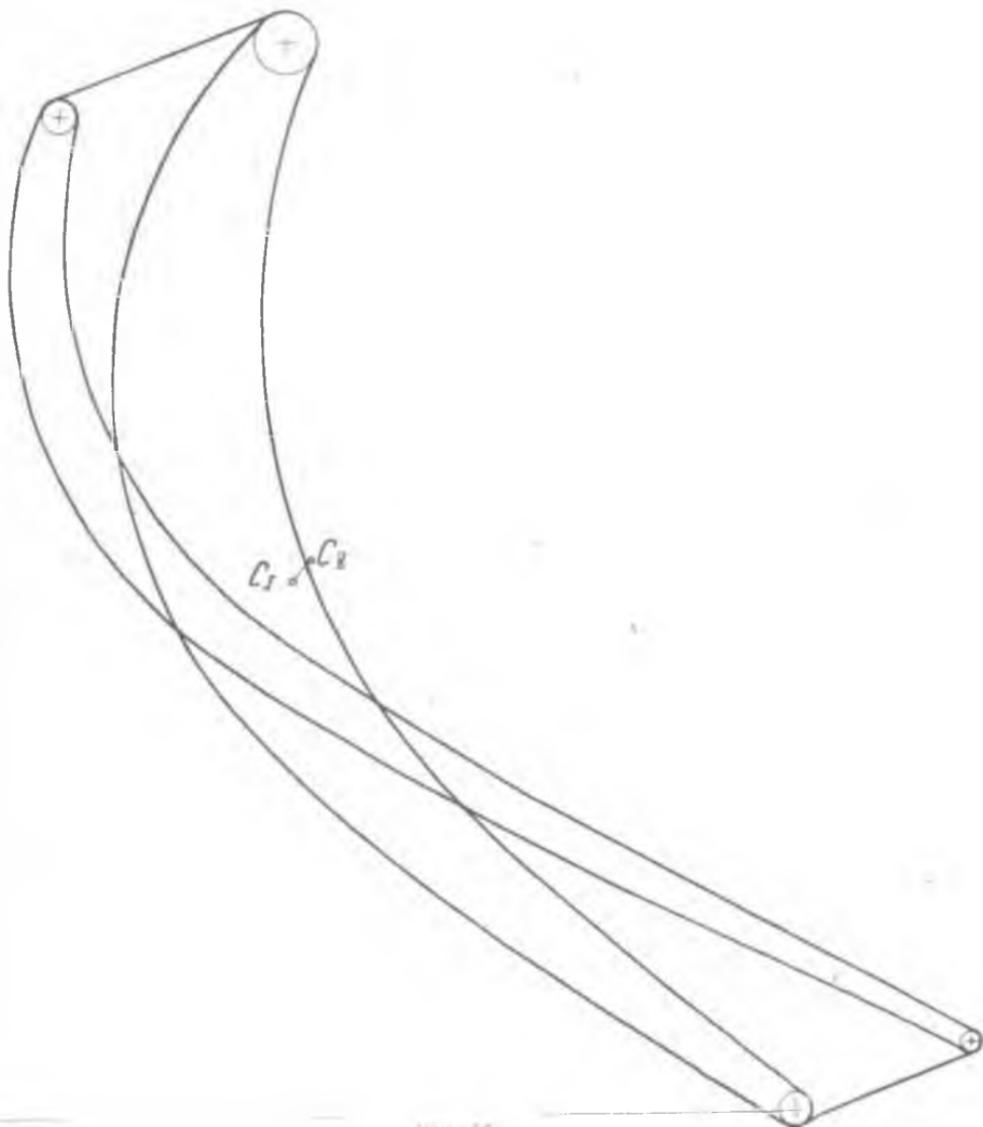
Таблица 17

№ УЧ-КО	R_{cp} , мм	C_{10} , м/сек	C_{20} , м/сек	C_{10} , м/сек	C_{20} , м/сек	C_{20} , м/сек	C_{20} , м/сек	X_{cp} , мм	$P_{1,sp}$, кг/см ²	t_{op} , мм	$C_w \cdot C_{20}$, м/сек	$C_{10} \cdot C_{20}$, м/сек	$P_{1,sp} \cdot P_{2,1}$, кг/см ²	$\frac{G}{q} \cdot 10^3$, кг/сек	$P_{21} \cdot 10^2$, кг	$\frac{G(C_{10} \cdot C_{20})}{q}$, кг
1	516,4	182	157,5	288,5	46,7	107,4	2,206	34,07	241,8	04,5	0,32	0,004525	1,095	0,111		
2	505,2	185,3	160,5	293,5	47,5	96,2	2,102	33,3	246,0	24,8	0,306	0,004506	1,109	0,118		
3	494,0	188	164,5	298	48,8	85,0	2,170	32,6	240,2	23,5	0,293	0,00452	1,125	0,106		
4	482,8	191	168	302	49,8	75,6	2,162	31,9	252,2	23	0,276	0,0045	1,137	0,1035		
5	471,6	194	171	307	51	68,6	2,141	31,1	256	23	0,255	0,00448	1,150	0,1031		
6	460,4	197	175	312	51,8	51,4	2,121	30,4	260,2	22	0,235	0,00475	1,163	0,0985		
7	449,2	201,5	179	318	53	40,2	2,086	29,6	265	22,5	0,212	0,00445	1,180	0,100		
8	438,0	204	182	323	53,8	30,0	2,071	28,95	268,2	22	0,185	0,00444	1,195	0,0977		
9	426,8	207	184,5	329	54,6	17,8	2,042	28,2	274,4	22,5	0,156	0,00439	1,207	0,099		
10	415,6	211	188	335	56,3	6,6	2,011	27,4	278,7	23	0,126	0,00435	1,212	0,100		

Продолжение табл. 17

№ УЧ-КА	$\frac{(R-P)}{x} \cdot 10^4$, кг	$P_{эл} \cdot 10^8$, кг	M_0 , кг·мм	M_u , кг·мм	φ , %	$\Delta \varphi_{х.ср.}$, кг/мм	$\Delta \varphi_{х.ср.}^2$, кг·мм ²	$A \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_{i, х.ср.}$, кг·мм	$\frac{\Delta \varphi_{х.ср.}^2}{R_{\Sigma} + X_{ср.}}$, кг/мм	A-B, кг·мм	$-k \cdot M_{у.ср.}$, кг·мм ²	$k \cdot M_{0,ср.}$, кг·мм ²	Q_1 , мм	Q_2 , мм	β , мм	
1	1,225	1,336	117,8	113,5	74,1	7960	$855 \cdot 10^3$		1655							
2	1,141	1,259	106,8	121,0	84,1	8090	$778 \cdot 10^3$		1540							
3	1,07	1,176	95,6	100	93,8	7980	$677 \cdot 10^3$	57047	1370							
4	0,987	1,09	84,0	80,5	102,6	7560	$568 \cdot 10^3$		1170	46877,75						
5	0,889	0,992	71,8	62	111,0	6950	$435 \cdot 10^3$		922	46877,75			36200	0,71		
6	0,800	0,898	59,7	46,1	114,9	6100	$314 \cdot 10^3$		683							
7	0,703	0,803	47,5	37,3	126,3	5090	$204 \cdot 10^3$		454							
8	0,600	0,698	34,65	20,25	133,5	3870	$112,3 \cdot 10^3$		256							
9	0,493	0,592	21,45	10,53	159,9	2485	$44,3 \cdot 10^3$		104							
10	0,384	0,484	8,0	3,19	145,7	962	$8,35 \cdot 10^3$		13,25							
										876925						
										$\frac{\sum R_{эл} \cdot X_{ср.}}{\sum P_{эл} \cdot X_{ср.}}$						

$R_0 = 409$



По данным, приведенным на рис.50, для построения сечения III-III имеем:

$$\beta_1 = 64^{\circ}59'; \quad \beta_2 = 32^{\circ}51';$$

$$\beta_{1к} = 62^{\circ}59'; \quad \beta_{2зф} = 30^{\circ}16'.$$

Принимаем первоначально $\beta_{2к} = \beta_{2зф}$.

По данным значений $\beta_{1к}$ и $\beta_{2к}$ и по графику приложения 4 находим угол установки

$$\gamma = 55^{\circ}30'.$$

Принимаем, что выходная кромка лопатки прямолинейна. Тогда, разделив пополам расстояние между центрами окружностей выходных кромок, получим положение центра выходной кромки среднего сечения.

Непосредственным измерением прямой, проведенной под углом γ , получаем хорду профиля $b = 43,7$ мм.

По приложению 2 находим $\bar{X}_{dм} = 0,26$.

Угол изгиба профиля

$$\Theta_k = 180^{\circ} - (62^{\circ}59' + 30^{\circ}16') = 83^{\circ}45'.$$

По приложению 3 имеем:

$$\frac{L_p}{b} = 1,091, \quad L_p = 1,091 \cdot 43,7 = 47,6 \text{ мм.}$$

максимальная толщина

$$d_m = 2 \left[\frac{120}{1,066 \cdot 47,6} - 0,26 \cdot 0,9 - (1 - 0,26) \cdot 0,5 \right] = 3,408 \text{ мм.}$$

$$\omega_1 = 3,79 \text{ arcctg} \frac{z_m - z_1}{\bar{X}_{dм} \cdot L_p} = 3,79 \text{ arcctg} \frac{1,704 - 0,9}{0,26 \cdot 47,6} = 10^{\circ}35'.$$

$$\omega_2 = 1,995 \text{ arcctg} \frac{1,707 - 0,5}{0,74 \cdot 47,6} = 3^{\circ}55'.$$

По приложению 5 находим

$$\left(\frac{t}{b} \right)_{opt} = 0,72.$$

$$t = \frac{\pi D_{ш}}{z_{р.к.}} = \frac{3,14 \cdot 926}{95} = 30,3 \text{ мм}, \quad \frac{t}{b} = \frac{30,3}{43,7} = 0,7.$$

Хорду исправлять не следует, т.к. отличие $\frac{t}{b}$ от $\left(\frac{t}{b} \right)_{opt}$ лежит в допустимых пределах.

Ширина «горла»:

$$a_2 = t \cdot \sin \beta_{2\text{эф}} = 30,3 \cdot \sin 30^\circ 16' = 15,3 \text{ мм} ,$$

$$a_2 + r_2 = 15,3 + 0,5 = 15,8 \text{ мм} .$$

Следуя рекомендациям методики, строим профиль среднего сечения (рис.57). Его геометрические характеристики сведены в таблицу 18.

Центр тяжести профиля среднего сечения должен лежать на середине отрезка, соединяющего центры тяжести корневого и периферийного сечений.

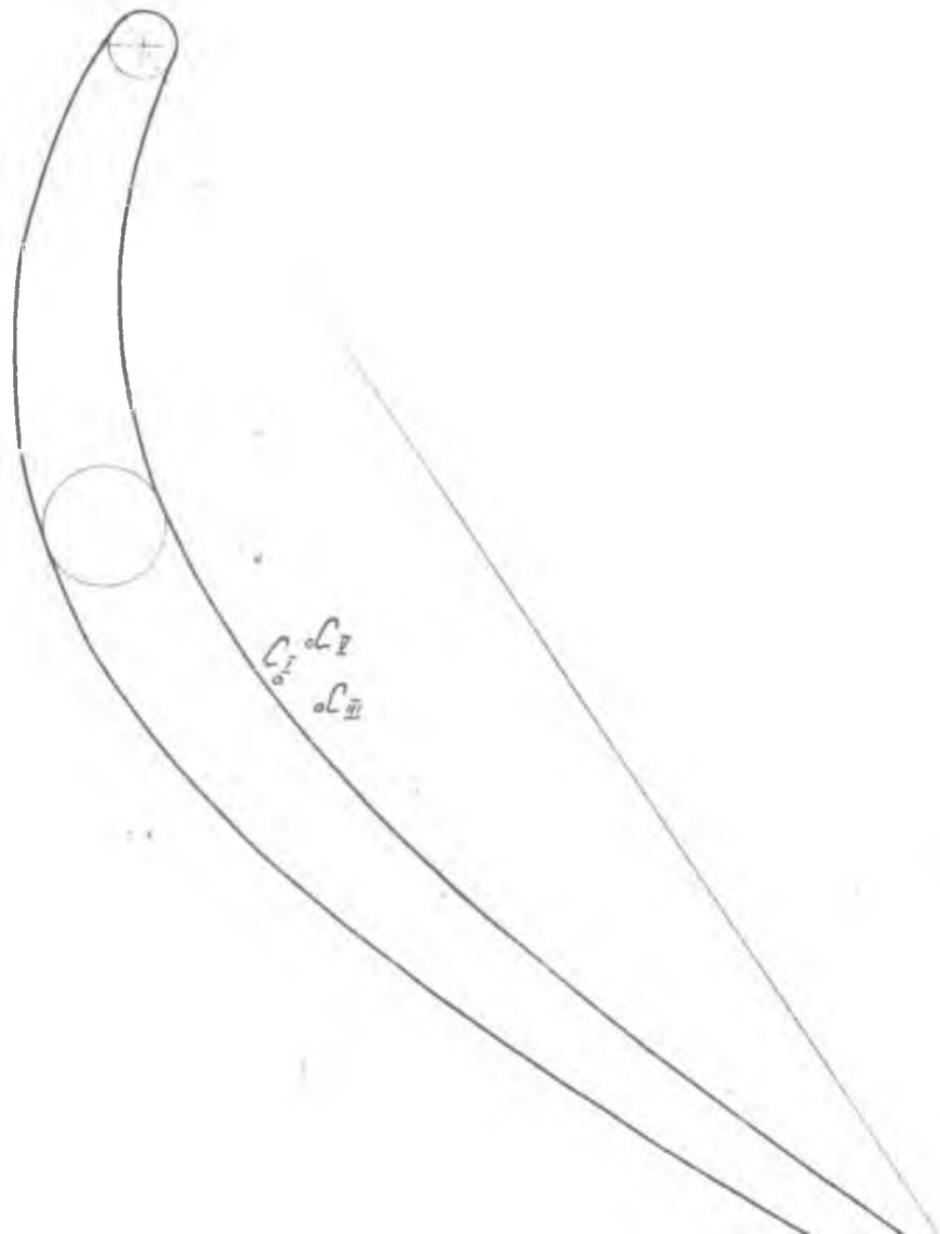
Полученный вариант профиля (вариант 1) оказался неудовлетворительным из-за положения центра тяжести, которое не соответствует расчетному (ниже расчетного).

Пытаясь сместить центр тяжести вверх, увеличиваем радиус входной кромки (с 0,9 до 0,95 мм). Чтобы при этом площадь профиля была близкой к заданной, при его построении используем меньшее значение X_{d_m} . У полученного варианта 2 (рис.58, табл. 19) площадь близка к заданной, значение X_{d_m} оказалось равным 11,6 мм вместо $X_{d_m} = 13,7$ мм у варианта 1. Из рисунка видно, что центр тяжести профиля сместился в нужном направлении, однако недостаточно.

Более удачным оказывается вариант 3 (рис.59). Этот профиль имеет $r_{\text{вх}} = 1,05$ мм, $X_{d_m} = 10,5$ мм. Как показывают расчеты (табл.20), площадь этого профиля оказалась равной $f_{\text{п}} = 121,8 \text{ мм}^2$, что близко к заданному значению. Центр тяжести этого профиля хотя и лежит близко к линии, соединяющей центры тяжести концевых сечений, однако не совпадает с серединой отрезка (правее середины). Выход из положения находится путем смещения всего профиля влево вдоль прямой линии, соединяющей выходные кромки (рис.60). Благодаря тому, что линии K_1K_1 и K_2K_2 примерно параллельны, входная кромка профиля сечения Ш-Ш близка к линии K_1K_1 , поэтому профиль не перестраиваем. Полученный вариант профиля среднего сечения принимаем за окончательный. Его основные геометрические данные:

$$\beta_{1к} = 63^\circ, \quad \beta_{2к} = 30^\circ 16', \quad r_1 = 1,05, \quad r_2 = 0,5, \quad \omega_1 = 15^\circ, \\ \omega_2 = 2^\circ 30', \quad d_m = 3,7, \quad \bar{X}_{d_m} = 0,226, \quad \gamma = 55^\circ 30'.$$

Если профилирование рабочей лопатки выполняется в ходе курсового проектирования, то оно может быть ограничено этими тремя сечениями.



Расчетный лист
определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля.

Объект Р.Л.
Сечение № II - III, в.ас I

№	K ₁	K ₂	Ось OX ₁						Ось OY ₁						Ось OZ ₂						
			l _в	l _н	l _в ·l _н	K(l _в ·l _н)	l _в ·l _н	l _н ·l _в	l _в	l _н	l _в ·l _н	K(l _в ·l _н)	l _в ·l _н	l _н ·l _в	l _в	l _н	l _в ·l _н	K(l _в ·l _н)	l _в ·l _н	l _н ·l _в	
1	0.5	0.33	24.8	12.5	12.3	6.15	39.3			3.5	3.3	0.2	0.1	6.8			4.4	3.6	0.5	0.25	8.3
2	1.5	2.33	21.0	10.2	1.2	4.803	30.8			3.45	3.19	0.3	0.45	6.6			5.2	3.5	1.7	2.55	8.7
3	2.5	6.33	16.1	8.0	8.1	20.25	24.1			3.55	3.1	0.45	1.225	6.65			7.3	3.2	4.1	10.25	10.5
4	3.5	12.33	9.3	7.0	2.3	6.03	16.3			3.5	2.9	0.6	2.1	6.4			13.8	2.9	10.4	36.4	16.2
5	4.5	20.33	0.21	6.2	-5.99	2.7	6.41			3.5	2.7	0.8	3.6	6.2			1.1	2.7	-1.6	-7.2	3.8
6	5.5	30.33		5.2	-5.2	-28.6	5.2			3.6	2.5	1.0	5.5	6.2			2.35	-2.3	-12.95	12.95	2.35
7	6.5	42.3		2.9	-2.9	-18.85	2.9			3.6	2.45	1.15	7.48	6.05			2.2	-2.2	-10.3	10.3	2.2
8	7.5	56.3		0.48	-0.48	-3.6	0.48			3.5	2.3	1.2	8.0	5.8			2.0	-2.0	-15.0	15.0	2.0
9	8.5	72.3								0.48	2.1	-1.82	-13.75	7.58			1.7	-1.7	-14.45	14.45	1.7
10	9.5	90.3									1.9	-1.9	-18.05	1.9			1.5	-1.5	-14.25	14.25	1.5
11	10.5	110.3									1.7	-1.7	-17.85	1.7			1.3	-1.3	-13.65	13.65	1.3
12	11.5	132.3									1.5	-1.5	-17.25	1.5			1.0	-1.0	-14.5	14.5	1.0
13	12.5	156.3									1.3	-1.3	-16.25	1.3							
14	13.5	182.3									0.78	-0.78	-18.53	0.78							
15	14.5	210.3																			
16	15.6	240.3																			
17	16.5	272.3																			
18	17.5	306.3																			
19	18.5	342.3																			
20	19.5	380.3																			

$$\begin{matrix} -41.8 & 123.49 \\ \text{Max}_1 & J_{Ox1} \end{matrix}$$

$$-64.325 \quad 60.46$$

$$-53.82 \quad 19.55$$

$$\begin{matrix} \text{Max}_1 & J_{Oy1} & J_{Oz1} \\ -23.3 & 170.6 & \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \text{Max}_2 & J_{Oz2} & J_{Oy2} \\ -13.6 & 170.6 & \end{matrix}$$

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3} = \frac{173.49 + 160.7 + 141.1}{3} = 129.16 \text{ мм}$$

$$y_{C1} = \frac{\text{Max}_1}{f} = \frac{-41.8}{129.16} = -0.345 \text{ мм}$$

$$x_{C1} = \frac{\text{Max}_1}{f} = \frac{-257.3}{129.16} = -2.12 \text{ мм}$$

$$J_{C1x1} = J_{Ox1} - f \cdot y_{C1}^2 = \text{мм}^4$$

$$J_{C1y1} = J_{Oy1} - f \cdot x_{C1}^2 = \text{мм}^4$$

$$A = J_{C1x1} + J_{C1y1} = \text{мм}^4$$

$$B = J_{C1y1} - J_{C1x1} = \text{мм}^4$$

$$x_{C2} = \frac{\text{Max}_2}{f} = \frac{-215.28}{129.16} = -1.775 \text{ мм}$$

$$J_{C2y1} = J_{Oy2} - f \cdot x_{C2}^2 = \text{мм}^4$$

$$J_{C1y2} = A - J_{C1x1} = \text{мм}^4$$

$$C = J_{C1y1} - J_{C1x1} = \text{мм}^4$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = \text{мм}^4$$

$$J_y = \text{мм}^4$$

$$J_z = A - J_y = \text{мм}^4$$

$$J_z = \text{мм}^4$$

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_z} =$$

$$2\alpha =$$

$$\alpha =$$

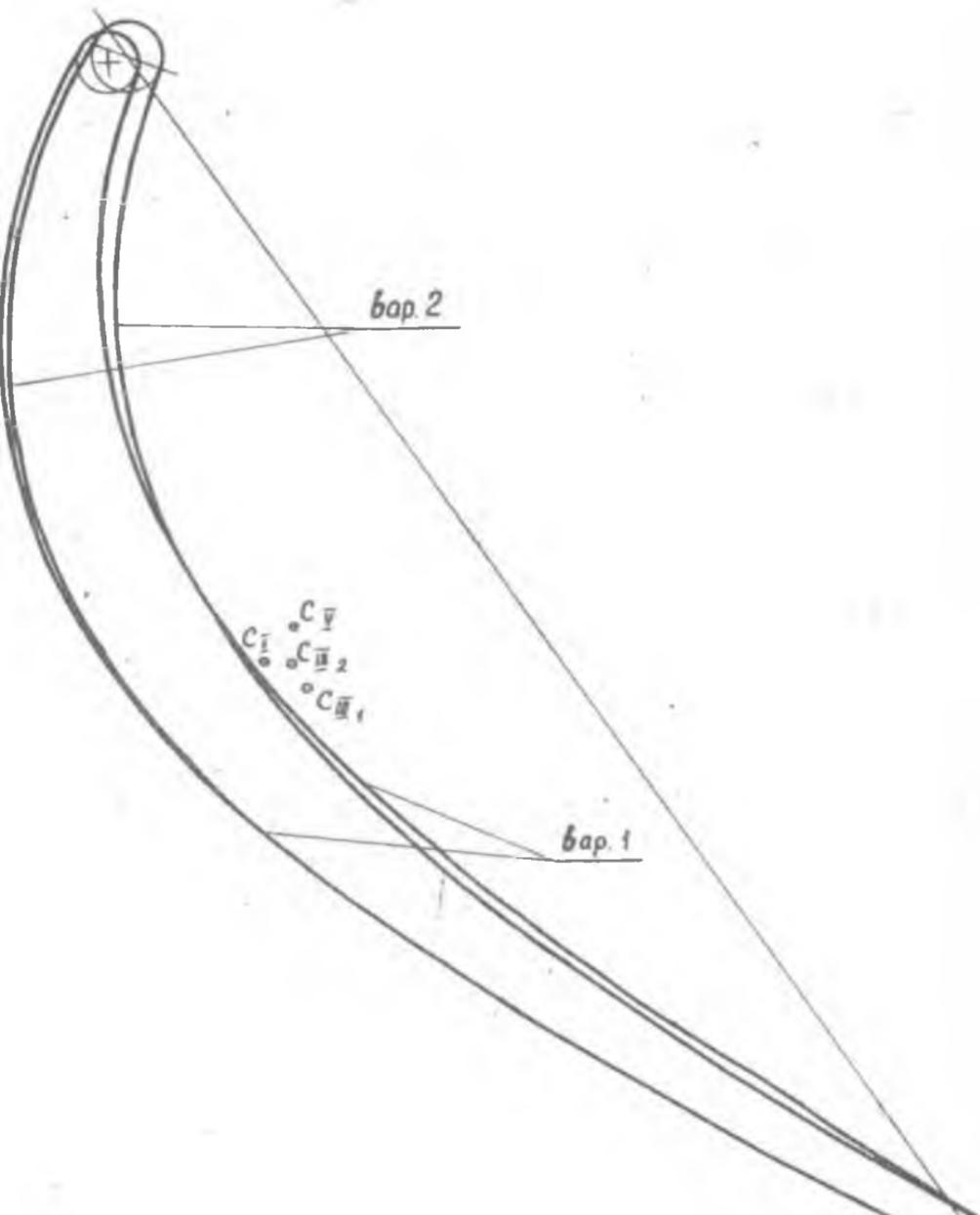


Таблица 19

- 252 -

Расчетный лист													Сумма			
Средствения площади, положения центра тяжести и моментов инерции													Средствения			
№	X ₁	X ₂	Ось OX ₁					Ось OY ₁					Ось OZ ₁			
			S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄
1	0,5	0,33	12,9	7,96	9,98	32,56	3,0	3,2	-0,2	-0,1	6,2	9,4	1,95	-0,55	-0,275	7,35
2	1,5	2,33	19,9	9,9	10,05	35,8	2,8	3,1	-0,5	-0,75	6,1	10	1,8	-1,8	-2,7	7,8
3	2,5	3,33	14,8	7,95	8,85	27,75	2,65	3,4	-0,75	-1,875	6,05	2,5	6,2	-1,0	-10,0	6,8
4	3,5	4,33	5,9	6,85	-0,95	-3,32	12,75	2,5	3,5	-1,0	-3,5	6,0	2,4	15,26	-1,8	-18,66
5	4,5	5,33	6,75	7,75	-2,75	6,15	2,3	3,6	-1,1	-4,85	5,9	2,1	12	-3,1	-13,95	5,1
6	5,5	6,33	4,85	4,85	-2,67	4,85	2,1	3,65	-1,55	-8,52	5,75	1,9	1,3	-1,3	-10,45	1,9
7	6,5	7,33	4,7	4,7	-3,06	4,7	2,0	3,8	-1,8	-11,7	5,8	1,7	1,7	-1,7	-11,75	1,7
8	7,5	8,33	1,7	1,7	-0,3	1,775	1,8	3,95	-2,15	-16,18	5,75	1,55	1,55	-1,55	-11,5	1,55
9	8,5	9,33					1,65	4,05	-2,45	-20,23	5,65	1,4	1,4	-1,4	-11,9	1,4
10	9,5	10,33					1,5	4,15	-2,85	-24,25	5,5	1,3	1,3	-1,3	-12,35	1,3
11	10,5	11,33					1,4	4,25	-3,25	-28,25	5,4	1,15	1,15	-1,15	-12,75	1,15
12	11,5	12,33					1,25	4,35	-3,65	-32,25	5,25	0,9	0,9	-0,9	-13,15	0,9
13	12,5	13,33					1,1	4,45	-4,05	-36,25	5,1					
14	13,5	14,33														
15	14,5	15,33														
16	15,5	16,33														
17	16,5	17,33														
18	17,5	18,33														
19	18,5	19,33														
20	19,5	20,33														

82,18 114,815
Моменты I_x I_y I_{xy}

2,625 50,175
Моменты I_x I_y I_{xy}

2,015 53,61
Моменты I_x I_y I_{xy}

$$f = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{2} = \frac{12,9 + 19,9 + 14,8}{2} = 13,8$$

$$Y_{C1} = \frac{M_{x1}}{f} = \frac{-62,36}{114,9} = -0,558 \text{ м}$$

$$X_{C1} = \frac{M_{y1}}{f} = \frac{10,09}{114,9} = 0,09 \text{ м}$$

$$I_{C1x} = I_{Ox1} - f Y_{C1}^2 = \dots$$

$$I_{C1y} = I_{Oy1} - f X_{C1}^2 = \dots$$

$$A = I_{C1x} + I_{C1y} = \dots$$

$$B = I_{C1x} - I_{C1y} = \dots$$

$$X_{C2} = \frac{M_{Ox2}}{f} = \frac{8,32}{114,9} = 0,072 \text{ м}$$

$$Y_{C2} = \frac{M_{Oy2}}{f} = \frac{1,6}{114,9} = 0,014 \text{ м}$$

$$I_{C2x} = A - I_{C1x} = \dots$$

$$I_{C2y} = I_{C1y} - I_{C1x} = \dots$$

$$I_y = \frac{A}{2} - \frac{B}{2} = \frac{1,6}{2} = 0,8$$

$$\cos \alpha = \frac{I_y}{I_x} = \dots$$

$$\alpha = \dots$$

Таблица 20

- 153 -

Расчетный лист

определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля

Объект Р.А.

Геченский III - III, Вар 3

N	Ось OX ₁								Ось OY ₁								Ось OZ ₁				
	K ₁	K ₂	z ₀	z ₁	z ₂	K(z ₂ -z ₁)	K(z ₁ -z ₀)	z ₀	z ₁	z ₂	z ₃	K(z ₃ -z ₂)	K(z ₂ -z ₁)	K(z ₁ -z ₀)	z ₀	z ₁	z ₂	K(z ₂ -z ₁)	K(z ₁ -z ₀)		
1	0.5	0.33	208	13.3	7.53	3.765	34.13			3.0	3.25	-0.25	-0.125	0.25			3.4	4.1	-0.7	-0.35	7.5
2	1.5	2.33	203	10.6	9.8	14.7	10.8			2.8	3.5	-0.7	-1.05	0.3			3.0	5.3	-2.3	-3.45	8.3
3	2.5	3.33	112	9.05	6.45	15.4	24.25			2.6	3.8	-1.2	-3.0	0.4			2.5	7.92	-5.32	-18.2	10.42
4	3.5	4.33	8.0	7.6	0.4	1.4	15.6			2.45	4.0	-1.55	-5.78	0.45			2.35	15.3	-12.95	-45.3	17.65
5	4.5	5.33		6.8	-6.8	-30.6	6.8			2.3	4.2	-1.9	-8.55	0.5			2.1	4.4	-2.3	-10.35	6.5
6	5.5	6.33		5.8	-5.8	-31.9	5.8			2.1	4.3	-2.2	-12.1	0.4			1.9	1.9	-0.45	-10.45	1.9
7	6.5	7.33		4.85	-4.85	-34.5	4.85			2.0	4.5	-2.5	-16.25	0.5			1.7	1.7	-1.05	-11.05	1.7
8	7.5	8.33		3.85	-3.85	-38.5	3.85			1.8	4.6	-2.8	-21.0	0.4			1.5	1.5	-1.2	-12.2	1.5
9	8.5	9.33		2.85	-2.85	-43.5	2.85			1.65	4.7	-3.05	-28.93	0.35			1.4	1.4	-1.4	-14.4	1.4
10	9.5	10.33		1.85	-1.85	-49.5	1.85			1.5	4.5	-3.0	-36.0	0.6			1.25	1.25	-1.6	-15.6	1.25
11	10.5	11.33		0.85	-0.85	-56.5	0.85			1.35	4.5	-3.15	-44.18	1.35			1.15	1.15	-1.7	-17.7	1.15
12	11.5	12.33		0	0	-64.5	0			1.2	4.5	-3.3	-54.0	1.2			0.72	0.72	-1.8	-18.8	0.72
13	12.5	13.33		0	0	-73.5	0			1.0	4.0	-3.0	-66.0	1.0							
14	13.5	14.33		0	0	-84.0	0														
15	14.5	15.33		0	0	-96.0	0														
16	15.5	16.33		0	0	-110.0	0														
17	16.5	17.33		0	0	-126.0	0														
18	17.5	18.33		0	0	-144.0	0														
19	18.5	19.33		0	0	-164.0	0														
20	19.5	20.33		0	0	-186.0	0														

$$-72.585 / 24.076$$

$$-22.105 / 60.6$$

$$4.13 / 60.08$$

$$f = f_1 + f_2 + f_3 = 18.076 + 12.1 + 12.1 = 42.276 \text{ мм}$$

$$Y_{ce1} = \frac{Moy_1}{f} = \frac{-72.585}{42.276} = -1.717 \text{ мм}$$

$$X_{ce1} = \frac{Moy_1}{f} = \frac{-22.105}{42.276} = -0.523 \text{ мм}$$

$$Z_{ce1} = Z_{ce2} - f \cdot Y_{ce1} = \dots \text{ мм}^2$$

$$Z_{ce1} = Z_{ce2} - f \cdot X_{ce1}^2 = \dots \text{ мм}^2$$

$$A = Z_{ce1} + Z_{ce2} = \dots \text{ мм}^2$$

$$B = Z_{ce1} - Z_{ce2} = \dots \text{ мм}^2$$

$$K_{ce1} = \frac{Moy_2}{f} = \frac{15.52}{42.276} = 0.367 \text{ мм}$$

$$Z_{ce1} = Z_{ce2} - f \cdot X_{ce1}^2 = \dots \text{ мм}^2$$

$$Z_{ce2} = A - Z_{ce1} = \dots \text{ мм}^2$$

$$C = Z_{ce2} - Z_{ce1} = \dots \text{ мм}^2$$

$$J_y = \frac{A}{2} + \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{B}\right)^2} = \dots \text{ мм}^4$$

$$J_y = \dots \text{ мм}^4$$

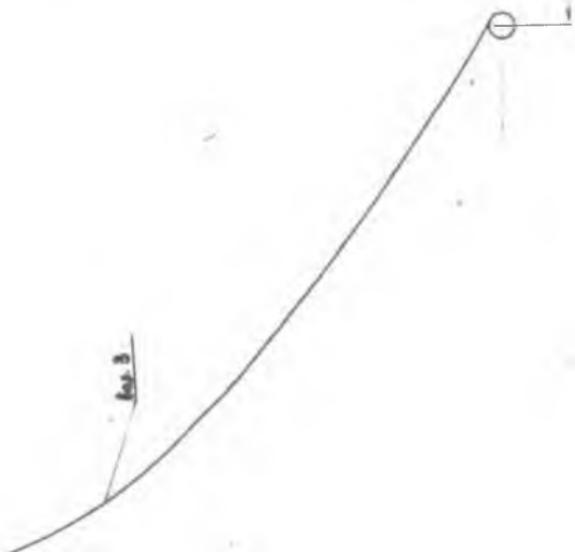
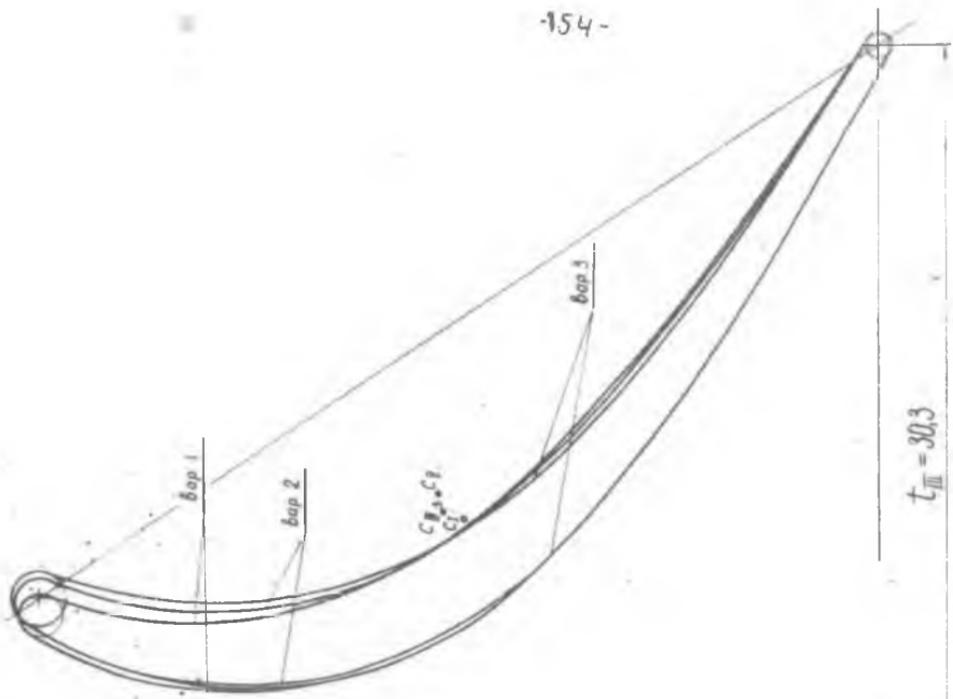
$$J_x = A - J_y = \dots \text{ мм}^4$$

$$J_x = \dots \text{ мм}^4$$

$$\cos 2\alpha = \frac{B}{J_y - J_x} = \dots$$

2α =

$$\alpha = \dots$$



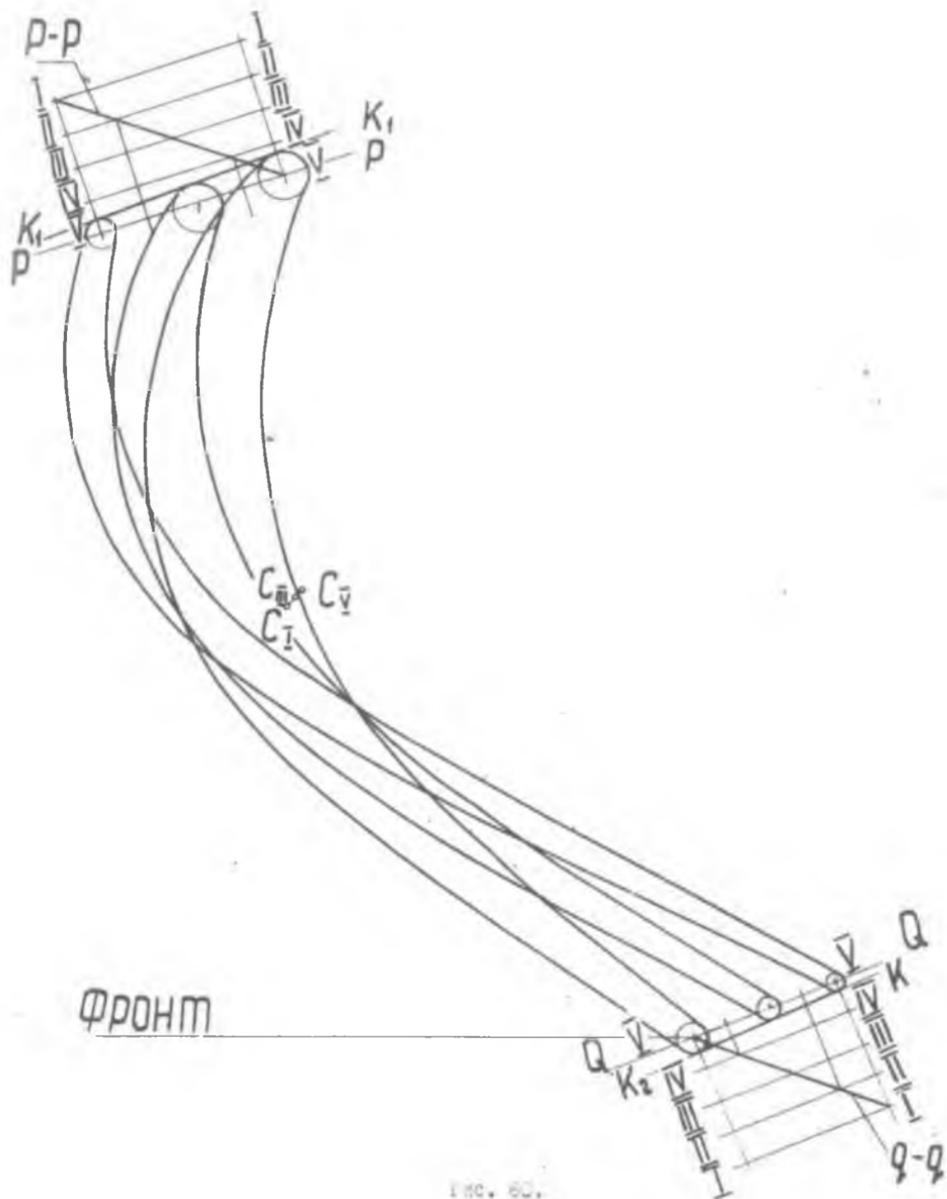


FIG. 80.

9. Построение профилей промежуточных сечений

Строим профили остальных промежуточных сечений, в рассматриваемом примере сечений П-П и IУ-IУ.

Как рекомендовалось в § 13, проектируем центры окружностей входных и выходных кромок уже имеющихся профилей трех сечений на плоскости Р и Q (рис.60). Плавно соединив соответствующие точки линиями р-р и q-q, получим первое приближение кривых распределения центров окружностей кромок по длине лопатки. Точки пересечения линии q-q со следами сечений П-П и IУ-IУ определяют положение выходных кромок этих сечений.

Имея совмещенное положение концевых и среднего сечений, рассечем лопатку тремя группами плоскостей 1,2,3, 4,5 и 6,7,8,9 (рис.61), ориентированными параллельно радиусу колеса. В секущих плоскостях (на рисунке, чтобы избежать загромождения, показаны не все из них) получаем при пересечении со следами плоскостей П-П и IУ-IУ точки этих профилей.

Строим пока профиль сечения П-П. Для этого точки в сечениях 1,2, 3,4...,9 сносим на основную проекцию. Огибающая этих точек дает первый вариант профиля П-П (пунктирная линия на рис.61). Полученный вариант профиля оказался неудовлетворительным по положению центра тяжести. Уже известными методами корректируем профиль П-П. Принятый вариант (рис.62) имеет заданное значение площади (табл. 21) и благоприятное расположение центра тяжести.

В связи с тем, что контуры принятого варианта профиля П-П (рис. 61, сплошная линия) привели к изменению форм сечений 1,2,3...,9, корректируем эти сечения (сплошные линии), и по ним получаем точки профиля IУ-IУ (рис. 63, табл. 22).

10. Проверочный расчет на прочность.

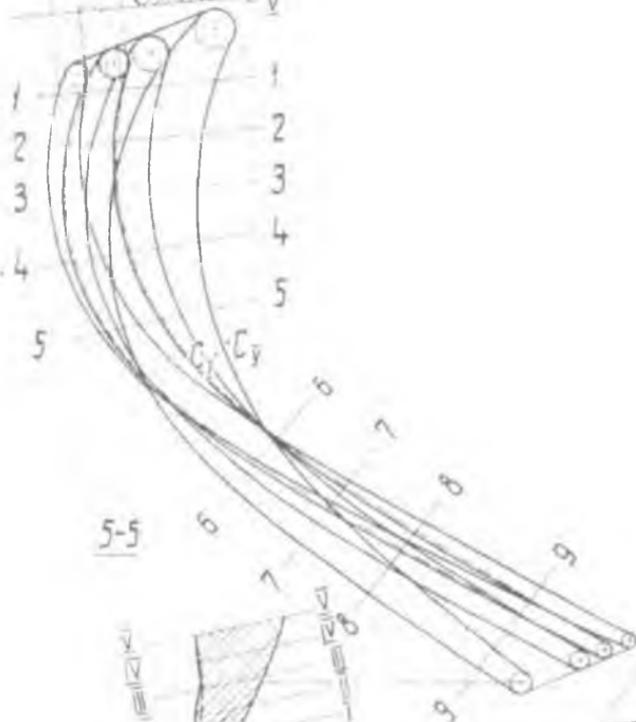
По фактической геометрии спрофилированной лопатки находим изгибающие моменты от центробежных сил.

Данные для расчета берем с рис.54,64 $[f = f(R); a, \beta = f(R)]$. Для удобства расчет проводим в форме таблицы (табл.23).

При этом

$$\Delta P_{i_u} = \frac{\gamma}{g} \cdot \omega^2 \cdot f_{i_{cp}} \cdot \Delta x_i \cdot \delta_{i_{cp}}$$

1-1, 3-3



5-5



9-9



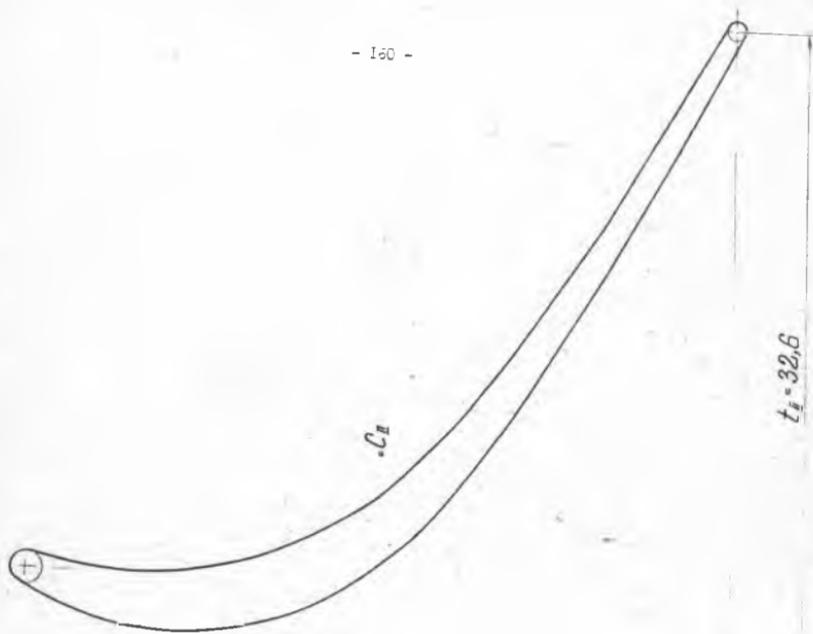
Расчетный лист
определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля

Объем АЛ

сечение №11-Д, Вар 2

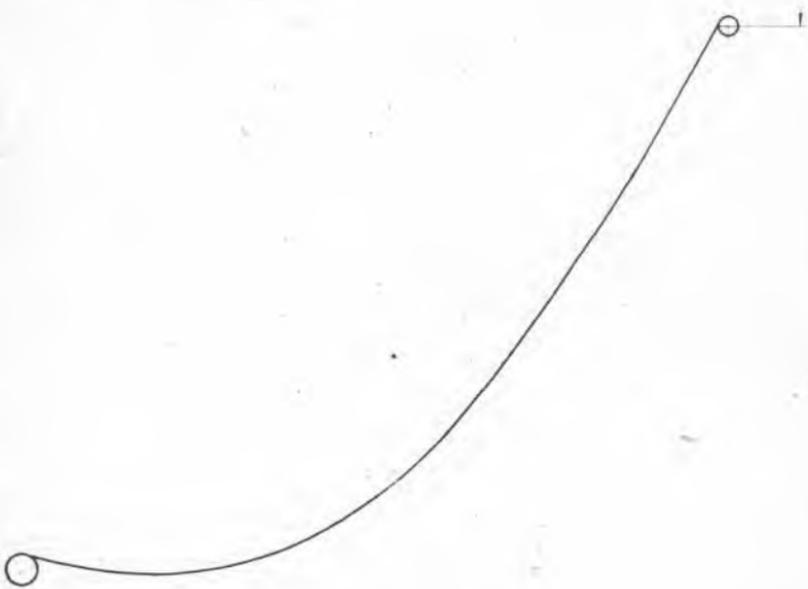
№	K ₁	K ₂	Ось OX ₁						Ось OY ₁						Ось OY ₂																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
			z ₁	z ₂	z ₃	z ₄	z ₅	z ₆	z ₇	z ₈	z ₉	z ₁₀	z ₁₁	z ₁₂	z ₁₃	z ₁₄	z ₁₅	z ₁₆	z ₁₇	z ₁₈	z ₁₉	z ₂₀																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1	0.5	0.33	4.5	10.8	17.1	23.4	29.7	36.0	42.3	48.6	54.9	61.2	67.5	73.8	80.1	86.4	92.7	99.0	105.3	111.6	117.9	124.2	130.5	136.8	143.1	149.4	155.7	162.0	168.3	174.6	180.9	187.2	193.5	199.8	206.1	212.4	218.7	225.0	231.3	237.6	243.9	250.2	256.5	262.8	269.1	275.4	281.7	288.0	294.3	300.6	306.9	313.2	319.5	325.8	332.1	338.4	344.7	351.0	357.3	363.6	369.9	376.2	382.5	388.8	395.1	401.4	407.7	414.0	420.3	426.6	432.9	439.2	445.5	451.8	458.1	464.4	470.7	477.0	483.3	489.6	495.9	502.2	508.5	514.8	521.1	527.4	533.7	540.0	546.3	552.6	558.9	565.2	571.5	577.8	584.1	590.4	596.7	603.0	609.3	615.6	621.9	628.2	634.5	640.8	647.1	653.4	659.7	666.0	672.3	678.6	684.9	691.2	697.5	703.8	710.1	716.4	722.7	729.0	735.3	741.6	747.9	754.2	760.5	766.8	773.1	779.4	785.7	792.0	798.3	804.6	810.9	817.2	823.5	829.8	836.1	842.4	848.7	855.0	861.3	867.6	873.9	880.2	886.5	892.8	899.1	905.4	911.7	918.0	924.3	930.6	936.9	943.2	949.5	955.8	962.1	968.4	974.7	981.0	987.3	993.6	999.9	1006.2	1012.5	1018.8	1025.1	1031.4	1037.7	1044.0	1050.3	1056.6	1062.9	1069.2	1075.5	1081.8	1088.1	1094.4	1100.7	1107.0	1113.3	1119.6	1125.9	1132.2	1138.5	1144.8	1151.1	1157.4	1163.7	1170.0	1176.3	1182.6	1188.9	1195.2	1201.5	1207.8	1214.1	1220.4	1226.7	1233.0	1239.3	1245.6	1251.9	1258.2	1264.5	1270.8	1277.1	1283.4	1289.7	1296.0	1302.3	1308.6	1314.9	1321.2	1327.5	1333.8	1340.1	1346.4	1352.7	1359.0	1365.3	1371.6	1377.9	1384.2	1390.5	1396.8	1403.1	1409.4	1415.7	1422.0	1428.3	1434.6	1440.9	1447.2	1453.5	1459.8	1466.1	1472.4	1478.7	1485.0	1491.3	1497.6	1503.9	1510.2	1516.5	1522.8	1529.1	1535.4	1541.7	1548.0	1554.3	1560.6	1566.9	1573.2	1579.5	1585.8	1592.1	1598.4	1604.7	1611.0	1617.3	1623.6	1629.9	1636.2	1642.5	1648.8	1655.1	1661.4	1667.7	1674.0	1680.3	1686.6	1692.9	1699.2	1705.5	1711.8	1718.1	1724.4	1730.7	1737.0	1743.3	1749.6	1755.9	1762.2	1768.5	1774.8	1781.1	1787.4	1793.7	1800.0	1806.3	1812.6	1818.9	1825.2	1831.5	1837.8	1844.1	1850.4	1856.7	1863.0	1869.3	1875.6	1881.9	1888.2	1894.5	1900.8	1907.1	1913.4	1919.7	1926.0	1932.3	1938.6	1944.9	1951.2	1957.5	1963.8	1970.1	1976.4	1982.7	1989.0	1995.3	2001.6	2007.9	2014.2	2020.5	2026.8	2033.1	2039.4	2045.7	2052.0	2058.3	2064.6	2070.9	2077.2	2083.5	2089.8	2096.1	2102.4	2108.7	2115.0	2121.3	2127.6	2133.9	2140.2	2146.5	2152.8	2159.1	2165.4	2171.7	2178.0	2184.3	2190.6	2196.9	2203.2	2209.5	2215.8	2222.1	2228.4	2234.7	2241.0	2247.3	2253.6	2259.9	2266.2	2272.5	2278.8	2285.1	2291.4	2297.7	2304.0	2310.3	2316.6	2322.9	2329.2	2335.5	2341.8	2348.1	2354.4	2360.7	2367.0	2373.3	2379.6	2385.9	2392.2	2398.5	2404.8	2411.1	2417.4	2423.7	2430.0	2436.3	2442.6	2448.9	2455.2	2461.5	2467.8	2474.1	2480.4	2486.7	2493.0	2499.3	2505.6	2511.9	2518.2	2524.5	2530.8	2537.1	2543.4	2549.7	2556.0	2562.3	2568.6	2574.9	2581.2	2587.5	2593.8	2600.1	2606.4	2612.7	2619.0	2625.3	2631.6	2637.9	2644.2	2650.5	2656.8	2663.1	2669.4	2675.7	2682.0	2688.3	2694.6	2700.9	2707.2	2713.5	2719.8	2726.1	2732.4	2738.7	2745.0	2751.3	2757.6	2763.9	2770.2	2776.5	2782.8	2789.1	2795.4	2801.7	2808.0	2814.3	2820.6	2826.9	2833.2	2839.5	2845.8	2852.1	2858.4	2864.7	2871.0	2877.3	2883.6	2889.9	2896.2	2902.5	2908.8	2915.1	2921.4	2927.7	2934.0	2940.3	2946.6	2952.9	2959.2	2965.5	2971.8	2978.1	2984.4	2990.7	2997.0	3003.3	3009.6	3015.9	3022.2	3028.5	3034.8	3041.1	3047.4	3053.7	3060.0	3066.3	3072.6	3078.9	3085.2	3091.5	3097.8	3104.1	3110.4	3116.7	3123.0	3129.3	3135.6	3141.9	3148.2	3154.5	3160.8	3167.1	3173.4	3179.7	3186.0	3192.3	3198.6	3204.9	3211.2	3217.5	3223.8	3230.1	3236.4	3242.7	3249.0	3255.3	3261.6	3267.9	3274.2	3280.5	3286.8	3293.1	3299.4	3305.7	3312.0	3318.3	3324.6	3330.9	3337.2	3343.5	3349.8	3356.1	3362.4	3368.7	3375.0	3381.3	3387.6	3393.9	3400.2	3406.5	3412.8	3419.1	3425.4	3431.7	3438.0	3444.3	3450.6	3456.9	3463.2	3469.5	3475.8	3482.1	3488.4	3494.7	3501.0	3507.3	3513.6	3520.0	3526.3	3532.6	3538.9	3545.2	3551.5	3557.8	3564.1	3570.4	3576.7	3583.0	3589.3	3595.6	3601.9	3608.2	3614.5	3620.8	3627.1	3633.4	3639.7	3646.0	3652.3	3658.6	3664.9	3671.2	3677.5	3683.8	3690.1	3696.4	3702.7	3709.0	3715.3	3721.6	3727.9	3734.2	3740.5	3746.8	3753.1	3759.4	3765.7	3772.0	3778.3	3784.6	3790.9	3797.2	3803.5	3809.8	3816.1	3822.4	3828.7	3835.0	3841.3	3847.6	3853.9	3860.2	3866.5	3872.8	3879.1	3885.4	3891.7	3898.0	3904.3	3910.6	3916.9	3923.2	3929.5	3935.8	3942.1	3948.4	3954.7	3961.0	3967.3	3973.6	3979.9	3986.2	3992.5	3998.8	4005.1	4011.4	4017.7	4024.0	4030.3	4036.6	4042.9	4049.2	4055.5	4061.8	4068.1	4074.4	4080.7	4087.0	4093.3	4099.6	4105.9	4112.2	4118.5	4124.8	4131.1	4137.4	4143.7	4150.0	4156.3	4162.6	4168.9	4175.2	4181.5	4187.8	4194.1	4200.4	4206.7	4213.0	4219.3	4225.6	4231.9	4238.2	4244.5	4250.8	4257.1	4263.4	4269.7	4276.0	4282.3	4288.6	4294.9	4301.2	4307.5	4313.8	4320.1	4326.4	4332.7	4339.0	4345.3	4351.6	4357.9	4364.2	4370.5	4376.8	4383.1	4389.4	4395.7	4402.0	4408.3	4414.6	4420.9	4427.2	4433.5	4439.8	4446.1	4452.4	4458.7	4465.0	4471.3	4477.6	4483.9	4490.2	4496.5	4502.8	4509.1	4515.4	4521.7	4528.0	4534.3	4540.6	4546.9	4553.2	4559.5	4565.8	4572.1	4578.4	4584.7	4591.0	4597.3	4603.6	4609.9	4616.2	4622.5	4628.8	4635.1	4641.4	4647.7	4654.0	4660.3	4666.6	4672.9	4679.2	4685.5	4691.8	4698.1	4704.4	4710.7	4717.0	4723.3	4729.6	4735.9	4742.2	4748.5	4754.8	4761.1	4767.4	4773.7	4780.0	4786.3	4792.6	4798.9	4805.2	4811.5	4817.8	4824.1	4830.4	4836.7	4843.0	4849.3	4855.6	4861.9	4868.2	4874.5	4880.8	4887.1	4893.4	4899.7	4906.0	4912.3	4918.6	4924.9	4931.2	4937.5	4943.8	4950.1	4956.4	4962.7	4969.0	4975.3	4981.6	4987.9	4994.2	5000.5	5006.8	5013.1	5019.4	5025.7	5032.0	5038.3	5044.6	5050.9	5057.2	5063.5	5069.8	5076.1	5082.4	5088.7	5095.0	5101.3	5107.6	5113.9	5120.2	5126.5	5132.8	5139.1	5145.4	5151.7	5158.0	5164.3	5170.6	5176.9	5183.2	5189.5	5195.8	5202.1	5208.4	5214.7	5221.0	5227.3	5233.6	5239.9	5246.2	5252.5	5258.8	5265.1	5271.4	5277.7	5284.0	5290.3	5296.6	5302.9	5309.2	5315.5	5321.8	5328.1	5334.4	5340.7	5347.0	5353.3	5359.6	5365.9	5372.2	5378.5	5384.8	5391.1	5397.4	5403.7	5410.0	5416.3	5422.6	5428.9	5435.2	5441.5	5447.8	5454.1	5460.4	5466.7	5473.0	5479.3	5485.6	5491.9	5498.2	5504.5	5510.8	5517.1	5523.4	5529.7	5536.0	5542.3	5548.6	5554.9	5561.2	5567.5	5573.8	5580.1	5586.4	5592.7	5599.0	5605.3	5611.6	5617.9	5624.2	5630.5	5636.8	5643.1	5649.4	5655.7	5662.0	5668.3	5674.6	5680.9	5687.2	5693.5	5699.8	5706.1	5712.4	5718.7	5725.0	5731.3	5737.6	5743.9	5750.2	5756.5	5762.8	5769.1	5775.4	5781.7	5788.0	5794.3	5800.6	5806.9	5813.2	5819.5	5825.8	5832.1	5838.4	5844.7	5851.0	5857.3	5863.6	5869.9	5876.2	5882.5	5888.8	5895.1	5901.4	5907.7	5914.0	5920.3	5926.6	5932.9	5939.2	5945.5	5951.8	5958.1	5964.4	5970.7	5977.0	5983.3	5989.6	5995.9	6002.2	6008.5	6014.8	6021.1	6027.4	6033.7	6040.0	6046.3	6052.6	6058.9	6065.2	6071.5	6077.8	6084.1	6090.4	6096.7	6103.0	6109.3	6115.6	6121.9	6128.2	6134.5	6140.8	6147.1	6153.4	6159.7	6166.0	6172.3	6178.6	6184.9	6191.2	6197.5	6203.8	6210.1	6216.4	6222.7	6229.0	6235.3	6241.6	6247.9	6254.2	6260.5	6266.8	6273.1	6279.4	6285.7	6292.0	6298.3	6304.6	6310.9	6317.2	6323.5	6329.8	6336.1	6342.4	6348.7	6355.0	6361.3	6367.6	6373.9	6380.2	6386.5	6392.8	6399.1	6405.4	6411.7	6418.0	6424.3	6430.6	6436.9	6443.2	6449.5	6455.8	6462.1	6468.4	6474.7	6481.0	6487.3	6493.6	6500.0	6506.3	6512.6	6518.9	6525.2	6531.5	6537.8	6544.1	6550.4	6556.7	6563.0	6569.3	6575.6	6581.9	6588.2	6594.5	6600.8	6607.1	6613.4	6619.7	6626.0	6632.3	6638.6	6644.9	6651.2	6657.5	6663.8	6670.1	6676.4	6682.7	6689.0	6695.3	6701.6	6707.9	6714.2	6720.5	6726.8	6733.1	6739.4	6745.7	6752.0	6758.3	6764.6	6770.9	6777.2	6783.5	6789.8	6796.1	6802.4	6808.7	6815.0</

Расчетный лист															Объект Д.Л.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Определения площади, положения центра тяжести и моментов инерции профиля															Сечение № 1-1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
															Ось OX ₁		Ось OY ₁		Ось OX ₂																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
N°	K ₁	K ₂	b ₀	b ₁	b ₂ -b ₁	b ₃ -b ₂	b ₄ -b ₃	b ₅ -b ₄	b ₆ -b ₅	b ₇ -b ₆	b ₈	b ₉	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₁₅	b ₁₆	b ₁₇	b ₁₈	b ₁₉	b ₂₀	b ₂₁	b ₂₂	b ₂₃	b ₂₄	b ₂₅	b ₂₆	b ₂₇	b ₂₈	b ₂₉	b ₃₀	b ₃₁	b ₃₂	b ₃₃	b ₃₄	b ₃₅	b ₃₆	b ₃₇	b ₃₈	b ₃₉	b ₄₀	b ₄₁	b ₄₂	b ₄₃	b ₄₄	b ₄₅	b ₄₆	b ₄₇	b ₄₈	b ₄₉	b ₅₀	b ₅₁	b ₅₂	b ₅₃	b ₅₄	b ₅₅	b ₅₆	b ₅₇	b ₅₈	b ₅₉	b ₆₀	b ₆₁	b ₆₂	b ₆₃	b ₆₄	b ₆₅	b ₆₆	b ₆₇	b ₆₈	b ₆₉	b ₇₀	b ₇₁	b ₇₂	b ₇₃	b ₇₄	b ₇₅	b ₇₆	b ₇₇	b ₇₈	b ₇₉	b ₈₀	b ₈₁	b ₈₂	b ₈₃	b ₈₄	b ₈₅	b ₈₆	b ₈₇	b ₈₈	b ₈₉	b ₉₀	b ₉₁	b ₉₂	b ₉₃	b ₉₄	b ₉₅	b ₉₆	b ₉₇	b ₉₈	b ₉₉	b ₁₀₀	b ₁₀₁	b ₁₀₂	b ₁₀₃	b ₁₀₄	b ₁₀₅	b ₁₀₆	b ₁₀₇	b ₁₀₈	b ₁₀₉	b ₁₁₀	b ₁₁₁	b ₁₁₂	b ₁₁₃	b ₁₁₄	b ₁₁₅	b ₁₁₆	b ₁₁₇	b ₁₁₈	b ₁₁₉	b ₁₂₀	b ₁₂₁	b ₁₂₂	b ₁₂₃	b ₁₂₄	b ₁₂₅	b ₁₂₆	b ₁₂₇	b ₁₂₈	b ₁₂₉	b ₁₃₀	b ₁₃₁	b ₁₃₂	b ₁₃₃	b ₁₃₄	b ₁₃₅	b ₁₃₆	b ₁₃₇	b ₁₃₈	b ₁₃₉	b ₁₄₀	b ₁₄₁	b ₁₄₂	b ₁₄₃	b ₁₄₄	b ₁₄₅	b ₁₄₆	b ₁₄₇	b ₁₄₈	b ₁₄₉	b ₁₅₀	b ₁₅₁	b ₁₅₂	b ₁₅₃	b ₁₅₄	b ₁₅₅	b ₁₅₆	b ₁₅₇	b ₁₅₈	b ₁₅₉	b ₁₆₀	b ₁₆₁	b ₁₆₂	b ₁₆₃	b ₁₆₄	b ₁₆₅	b ₁₆₆	b ₁₆₇	b ₁₆₈	b ₁₆₉	b ₁₇₀	b ₁₇₁	b ₁₇₂	b ₁₇₃	b ₁₇₄	b ₁₇₅	b ₁₇₆	b ₁₇₇	b ₁₇₈	b ₁₇₉	b ₁₈₀	b ₁₈₁	b ₁₈₂	b ₁₈₃	b ₁₈₄	b ₁₈₅	b ₁₈₆	b ₁₈₇	b ₁₈₈	b ₁₈₉	b ₁₉₀	b ₁₉₁	b ₁₉₂	b ₁₉₃	b ₁₉₄	b ₁₉₅	b ₁₉₆	b ₁₉₇	b ₁₉₈	b ₁₉₉	b ₂₀₀	b ₂₀₁	b ₂₀₂	b ₂₀₃	b ₂₀₄	b ₂₀₅	b ₂₀₆	b ₂₀₇	b ₂₀₈	b ₂₀₉	b ₂₁₀	b ₂₁₁	b ₂₁₂	b ₂₁₃	b ₂₁₄	b ₂₁₅	b ₂₁₆	b ₂₁₇	b ₂₁₈	b ₂₁₉	b ₂₂₀	b ₂₂₁	b ₂₂₂	b ₂₂₃	b ₂₂₄	b ₂₂₅	b ₂₂₆	b ₂₂₇	b ₂₂₈	b ₂₂₉	b ₂₃₀	b ₂₃₁	b ₂₃₂	b ₂₃₃	b ₂₃₄	b ₂₃₅	b ₂₃₆	b ₂₃₇	b ₂₃₈	b ₂₃₉	b ₂₄₀	b ₂₄₁	b ₂₄₂	b ₂₄₃	b ₂₄₄	b ₂₄₅	b ₂₄₆	b ₂₄₇	b ₂₄₈	b ₂₄₉	b ₂₅₀	b ₂₅₁	b ₂₅₂	b ₂₅₃	b ₂₅₄	b ₂₅₅	b ₂₅₆	b ₂₅₇	b ₂₅₈	b ₂₅₉	b ₂₆₀	b ₂₆₁	b ₂₆₂	b ₂₆₃	b ₂₆₄	b ₂₆₅	b ₂₆₆	b ₂₆₇	b ₂₆₈	b ₂₆₉	b ₂₇₀	b ₂₇₁	b ₂₇₂	b ₂₇₃	b ₂₇₄	b ₂₇₅	b ₂₇₆	b ₂₇₇	b ₂₇₈	b ₂₇₉	b ₂₈₀	b ₂₈₁	b ₂₈₂	b ₂₈₃	b ₂₈₄	b ₂₈₅	b ₂₈₆	b ₂₈₇	b ₂₈₈	b ₂₈₉	b ₂₉₀	b ₂₉₁	b ₂₉₂	b ₂₉₃	b ₂₉₄	b ₂₉₅	b ₂₉₆	b ₂₉₇	b ₂₉₈	b ₂₉₉	b ₃₀₀	b ₃₀₁	b ₃₀₂	b ₃₀₃	b ₃₀₄	b ₃₀₅	b ₃₀₆	b ₃₀₇	b ₃₀₈	b ₃₀₉	b ₃₁₀	b ₃₁₁	b ₃₁₂	b ₃₁₃	b ₃₁₄	b ₃₁₅	b ₃₁₆	b ₃₁₇	b ₃₁₈	b ₃₁₉	b ₃₂₀	b ₃₂₁	b ₃₂₂	b ₃₂₃	b ₃₂₄	b ₃₂₅	b ₃₂₆	b ₃₂₇	b ₃₂₈	b ₃₂₉	b ₃₃₀	b ₃₃₁	b ₃₃₂	b ₃₃₃	b ₃₃₄	b ₃₃₅	b ₃₃₆	b ₃₃₇	b ₃₃₈	b ₃₃₉	b ₃₄₀	b ₃₄₁	b ₃₄₂	b ₃₄₃	b ₃₄₄	b ₃₄₅	b ₃₄₆	b ₃₄₇	b ₃₄₈	b ₃₄₉	b ₃₅₀	b ₃₅₁	b ₃₅₂	b ₃₅₃	b ₃₅₄	b ₃₅₅	b ₃₅₆	b ₃₅₇	b ₃₅₈	b ₃₅₉	b ₃₆₀	b ₃₆₁	b ₃₆₂	b ₃₆₃	b ₃₆₄	b ₃₆₅	b ₃₆₆	b ₃₆₇	b ₃₆₈	b ₃₆₉	b ₃₇₀	b ₃₇₁	b ₃₇₂	b ₃₇₃	b ₃₇₄	b ₃₇₅	b ₃₇₆	b ₃₇₇	b ₃₇₈	b ₃₇₉	b ₃₈₀	b ₃₈₁	b ₃₈₂	b ₃₈₃	b ₃₈₄	b ₃₈₅	b ₃₈₆	b ₃₈₇	b ₃₈₈	b ₃₈₉	b ₃₉₀	b ₃₉₁	b ₃₉₂	b ₃₉₃	b ₃₉₄	b ₃₉₅	b ₃₉₆	b ₃₉₇	b ₃₉₈	b ₃₉₉	b ₄₀₀	b ₄₀₁	b ₄₀₂	b ₄₀₃	b ₄₀₄	b ₄₀₅	b ₄₀₆	b ₄₀₇	b ₄₀₈	b ₄₀₉	b ₄₁₀	b ₄₁₁	b ₄₁₂	b ₄₁₃	b ₄₁₄	b ₄₁₅	b ₄₁₆	b ₄₁₇	b ₄₁₈	b ₄₁₉	b ₄₂₀	b ₄₂₁	b ₄₂₂	b ₄₂₃	b ₄₂₄	b ₄₂₅	b ₄₂₆	b ₄₂₇	b ₄₂₈	b ₄₂₉	b ₄₃₀	b ₄₃₁	b ₄₃₂	b ₄₃₃	b ₄₃₄	b ₄₃₅	b ₄₃₆	b ₄₃₇	b ₄₃₈	b ₄₃₉	b ₄₄₀	b ₄₄₁	b ₄₄₂	b ₄₄₃	b ₄₄₄	b ₄₄₅	b ₄₄₆	b ₄₄₇	b ₄₄₈	b ₄₄₉	b ₄₅₀	b ₄₅₁	b ₄₅₂	b ₄₅₃	b ₄₅₄	b ₄₅₅	b ₄₅₆	b ₄₅₇	b ₄₅₈	b ₄₅₉	b ₄₆₀	b ₄₆₁	b ₄₆₂	b ₄₆₃	b ₄₆₄	b ₄₆₅	b ₄₆₆	b ₄₆₇	b ₄₆₈	b ₄₆₉	b ₄₇₀	b ₄₇₁	b ₄₇₂	b ₄₇₃	b ₄₇₄	b ₄₇₅	b ₄₇₆	b ₄₇₇	b ₄₇₈	b ₄₇₉	b ₄₈₀	b ₄₈₁	b ₄₈₂	b ₄₈₃	b ₄₈₄	b ₄₈₅	b ₄₈₆	b ₄₈₇	b ₄₈₈	b ₄₈₉	b ₄₉₀	b ₄₉₁	b ₄₉₂	b ₄₉₃	b ₄₉₄	b ₄₉₅	b ₄₉₆	b ₄₉₇	b ₄₉₈	b ₄₉₉	b ₅₀₀	b ₅₀₁	b ₅₀₂	b ₅₀₃	b ₅₀₄	b ₅₀₅	b ₅₀₆	b ₅₀₇	b ₅₀₈	b ₅₀₉	b ₅₁₀	b ₅₁₁	b ₅₁₂	b ₅₁₃	b ₅₁₄	b ₅₁₅	b ₅₁₆	b ₅₁₇	b ₅₁₈	b ₅₁₉	b ₅₂₀	b ₅₂₁	b ₅₂₂	b ₅₂₃	b ₅₂₄	b ₅₂₅	b ₅₂₆	b ₅₂₇	b ₅₂₈	b ₅₂₉	b ₅₃₀	b ₅₃₁	b ₅₃₂	b ₅₃₃	b ₅₃₄	b ₅₃₅	b ₅₃₆	b ₅₃₇	b ₅₃₈	b ₅₃₉	b ₅₄₀	b ₅₄₁	b ₅₄₂	b ₅₄₃	b ₅₄₄	b ₅₄₅	b ₅₄₆	b ₅₄₇	b ₅₄₈	b ₅₄₉	b ₅₅₀	b ₅₅₁	b ₅₅₂	b ₅₅₃	b ₅₅₄	b ₅₅₅	b ₅₅₆	b ₅₅₇	b ₅₅₈	b ₅₅₉	b ₅₆₀	b ₅₆₁	b ₅₆₂	b ₅₆₃	b ₅₆₄	b ₅₆₅	b ₅₆₆	b ₅₆₇	b ₅₆₈	b ₅₆₉	b ₅₇₀	b ₅₇₁	b ₅₇₂	b ₅₇₃	b ₅₇₄	b ₅₇₅	b ₅₇₆	b ₅₇₇	b ₅₇₈	b ₅₇₉	b ₅₈₀	b ₅₈₁	b ₅₈₂	b ₅₈₃	b ₅₈₄	b ₅₈₅	b ₅₈₆	b ₅₈₇	b ₅₈₈	b ₅₈₉	b ₅₉₀	b ₅₉₁	b ₅₉₂	b ₅₉₃	b ₅₉₄	b ₅₉₅	b ₅₉₆	b ₅₉₇	b ₅₉₈	b ₅₉₉	b ₆₀₀	b ₆₀₁	b ₆₀₂	b ₆₀₃	b ₆₀₄	b ₆₀₅	b ₆₀₆	b ₆₀₇	b ₆₀₈	b ₆₀₉	b ₆₁₀	b ₆₁₁	b ₆₁₂	b ₆₁₃	b ₆₁₄	b ₆₁₅	b ₆₁₆	b ₆₁₇	b ₆₁₈	b ₆₁₉	b ₆₂₀	b ₆₂₁	b ₆₂₂	b ₆₂₃	b ₆₂₄	b ₆₂₅	b ₆₂₆	b ₆₂₇	b ₆₂₈	b ₆₂₉	b ₆₃₀	b ₆₃₁	b ₆₃₂	b ₆₃₃	b ₆₃₄	b ₆₃₅	b ₆₃₆	b ₆₃₇	b ₆₃₈	b ₆₃₉	b ₆₄₀	b ₆₄₁	b ₆₄₂	b ₆₄₃	b ₆₄₄	b ₆₄₅	b ₆₄₆	b ₆₄₇	b ₆₄₈	b ₆₄₉	b ₆₅₀	b ₆₅₁	b ₆₅₂	b ₆₅₃	b ₆₅₄	b ₆₅₅	b ₆₅₆	b ₆₅₇	b ₆₅₈	b ₆₅₉	b ₆₆₀	b ₆₆₁	b ₆₆₂	b ₆₆₃	b ₆₆₄	b ₆₆₅	b ₆₆₆	b ₆₆₇	b ₆₆₈	b ₆₆₉	b ₆₇₀	b ₆₇₁	b ₆₇₂	b ₆₇₃	b ₆₇₄	b ₆₇₅	b ₆₇₆	b ₆₇₇	b ₆₇₈	b ₆₇₉	b ₆₈₀	b ₆₈₁	b ₆₈₂	b ₆₈₃	b ₆₈₄	b ₆₈₅	b ₆₈₆	b ₆₈₇	b ₆₈₈	b ₆₈₉	b ₆₉₀	b ₆₉₁	b ₆₉₂	b ₆₉₃	b ₆₉₄	b ₆₉₅	b ₆₉₆	b ₆₉₇	b ₆₉₈	b ₆₉₉	b ₇₀₀	b ₇₀₁	b ₇₀₂	b ₇₀₃	b ₇₀₄	b ₇₀₅	b ₇₀₆	b ₇₀₇	b ₇₀₈	b ₇₀₉	b ₇₁₀	b ₇₁₁	b ₇₁₂	b ₇₁₃	b ₇₁₄	b ₇₁₅	b ₇₁₆	b ₇₁₇	b ₇₁₈	b ₇₁₉	b ₇₂₀	b ₇₂₁	b ₇₂₂	b ₇₂₃	b ₇₂₄	b ₇₂₅	b ₇₂₆	b ₇₂₇	b ₇₂₈	b ₇₂₉	b ₇₃₀	b ₇₃₁	b ₇₃₂	b ₇₃₃	b ₇₃₄	b ₇₃₅	b ₇₃₆	b ₇₃₇	b ₇₃₈	b ₇₃₉	b ₇₄₀	b ₇₄₁	b ₇₄₂	b ₇₄₃	b ₇₄₄	b ₇₄₅	b ₇₄₆	b ₇₄₇	b ₇₄₈	b ₇₄₉	b ₇₅₀	b ₇₅₁	b ₇₅₂	b ₇₅₃	b ₇₅₄	b ₇₅₅	b ₇₅₆	b ₇₅₇	b ₇₅₈	b ₇₅₉	b ₇₆₀	b ₇₆₁	b ₇₆₂	b ₇₆₃	b ₇₆₄	b ₇₆₅	b ₇₆₆	b ₇₆₇	b ₇₆₈	b ₇₆₉	b ₇₇₀	b ₇₇₁	b ₇₇₂	b ₇₇₃	b ₇₇₄	b ₇₇₅	b ₇₇₆	b ₇₇₇	b ₇₇₈	b ₇₇₉	b ₇₈₀	b ₇₈₁	b ₇₈₂	b ₇₈₃	b ₇₈₄	b ₇₈₅	b ₇₈₆	b ₇₈₇	b ₇₈₈	b ₇₈₉	b ₇₉₀	b ₇₉₁	b ₇₉₂	b ₇₉₃	b ₇₉₄	b ₇₉₅	b ₇₉₆	b ₇₉₇	b ₇₉₈	b ₇₉₉	b ₈₀₀	b ₈₀₁	b ₈₀₂	b ₈₀₃	b ₈₀₄	b ₈₀₅	b ₈₀₆	b ₈₀₇	b ₈₀₈	b ₈₀₉	b ₈₁₀	b ₈₁₁	b ₈₁₂	b ₈₁₃	b ₈₁₄	b ₈₁₅	b ₈₁₆	b ₈₁₇	b ₈₁₈	b ₈₁₉	b ₈₂₀	b ₈₂₁	b ₈₂₂	b ₈₂₃	b ₈₂₄	b ₈₂₅	b ₈₂₆	b ₈₂₇	b ₈₂₈	b ₈₂₉	b ₈₃₀	b ₈₃₁	b ₈₃₂	b ₈₃₃	b ₈₃₄	b ₈₃₅	b ₈₃₆	b ₈₃₇	b ₈₃₈	b ₈₃₉	b ₈₄₀	b ₈₄₁	b ₈₄₂	b ₈₄₃	b ₈₄₄	b ₈₄₅	b ₈₄₆	b ₈₄₇	b ₈₄₈	b ₈₄₉	b ₈₅₀	b ₈₅₁	b ₈₅₂	b ₈₅₃	b ₈₅₄	b ₈₅₅	b ₈₅₆	b ₈₅₇	b ₈₅₈	b ₈₅₉	b ₈₆₀	b ₈₆₁	b ₈₆₂	b ₈₆₃	b ₈₆₄	b ₈₆₅	b ₈₆₆	b<



C_2

$t_1 = 32,6$



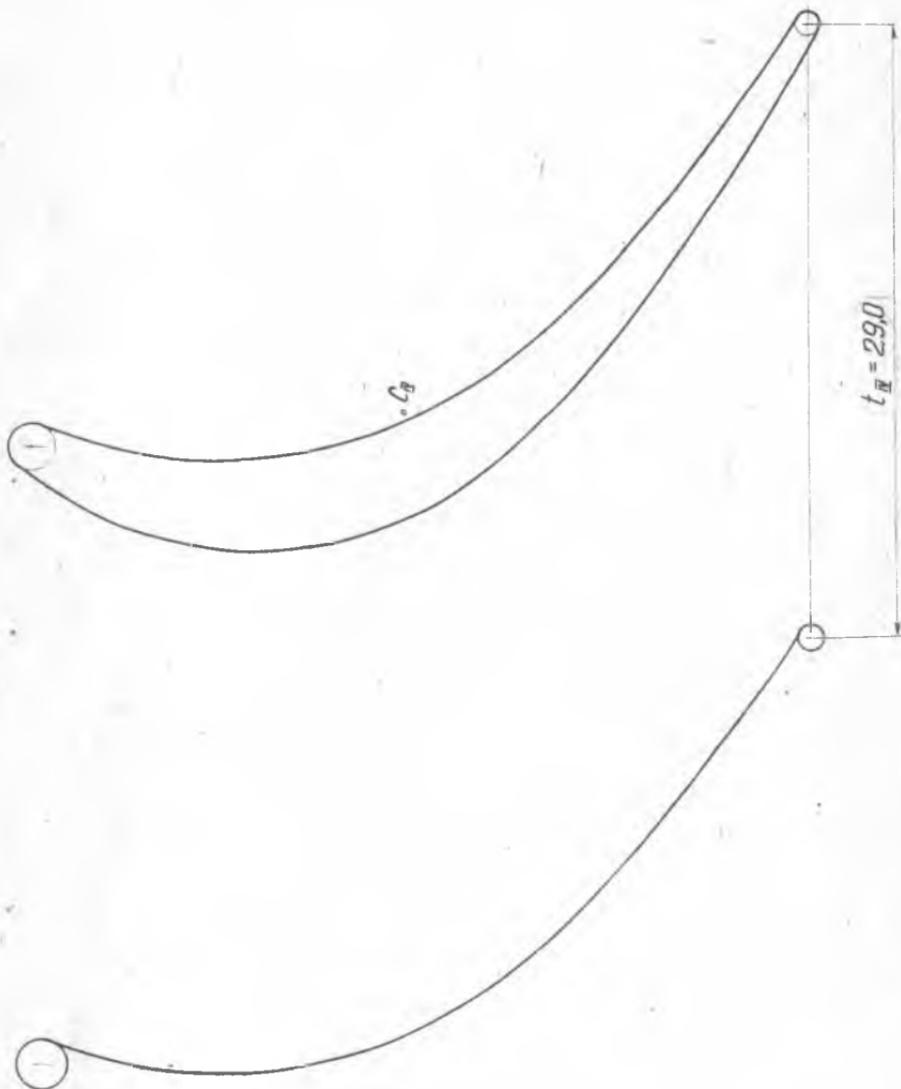


рис. 62.

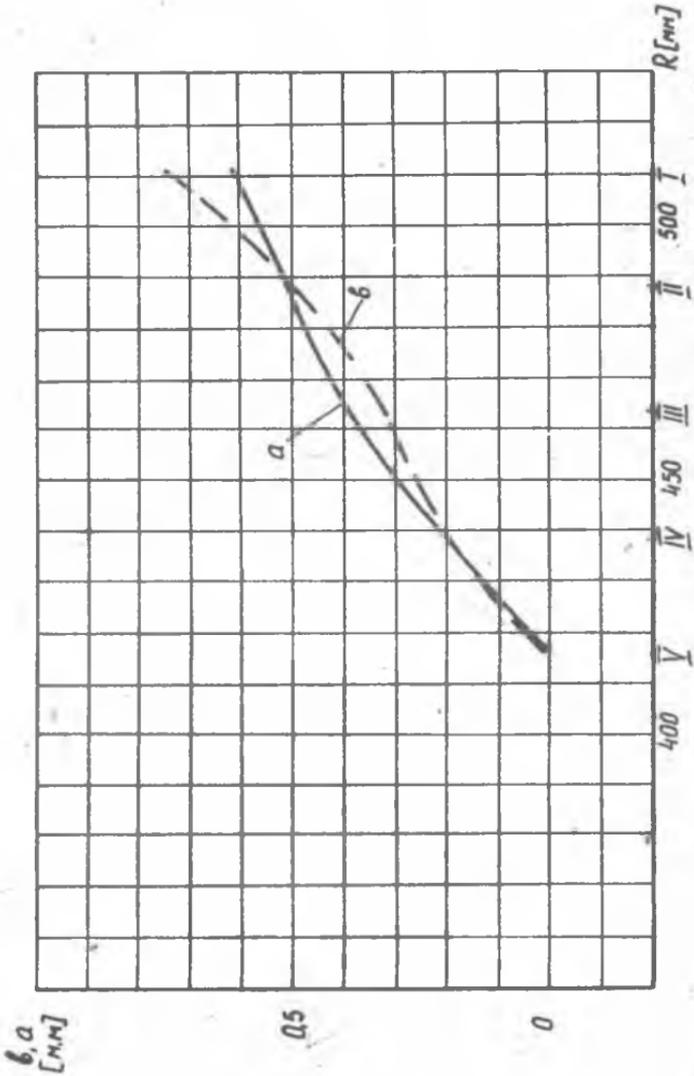


Рис. 64.

Таблица 23

№ участка	$f_{\text{ср}}$ мм ²	$R_{\text{ср}}$ мм	$\Delta P_{\text{гп}}$ кг	$-a_{\text{гп}}$ мм	$v_{\text{гп}}$ мм	$\mathcal{J}_{\text{гп}}$ мм	$z_0 + \mathcal{J}_{\text{гп}}$ мм	$t_{\text{гп}}$	$\Delta P_{\text{гп}}$ кг	$\Delta P_{\text{гп}} \cdot v_{\text{гп}}$ кг·мм	$\Delta P_{\text{гп}} \cdot a_{\text{гп}}$ кг·мм	$\Delta P_{\text{гп}} \cdot \mathcal{J}_{\text{гп}}$ кг·мм
1	69	516,4	75	0,604	0,8	107,4	516,4	0,00155	0,116	60	45,3	12,5
2	81	505,2	86,2	0,585	0,675	96,2	505,2	0,00134	0,115	58,2	50,4	11,05
3	95	494,0	97	0,503	0,505	85,0	494,0	0,00102	0,099	49,1	48,8	8,42
4	105,5	482,8	105,5	0,485	0,455	73,8	482,8	0,00094	0,092	48	48	7,52
5	114	471,6	113,5	0,493	0,370	62,6	471,6	0,00078	0,089	42	49,2	5,56
6	125,5	460,4	120	0,370	0,340	51,4	460,4	0,00067	0,0607	37	44,4	4,15
7	152	449,2	125	0,290	0,250	40,2	449,2	0,00056	0,0695	31,2	36,3	2,8
8	140	438,0	129,5	0,198	0,190	29,0	438,0	0,00043	0,056	24,6	25,6	1,625
9	151,5	426,8	136	0,100	0,110	17,8	426,8	0,00026	0,0351	15,1	13,6	0,625
10	165	415,6	143	0	0	6,6	415,6	-	-	0	0	0

 $\Sigma = 365,2 \quad \Sigma = 391,6 \quad \Sigma = 53,95$

нашли как

$$\Delta P_{i_u} = \Delta P_{i_R} \cdot \operatorname{tg} \delta$$

где

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta_{i_{cp}}}{R_0 + x_{i_{cp}}} ; R_0 = 409 \text{ мм} .$$

После заполнения таблицы, суммируя соответствующие столбцы ее, находим изгибающие моменты:

$$M_{a_{6m}}^u = -365,2 + 53,95 = -311,25 \text{ кг·мм} .$$

Аналогично, $M_{u_{6m}}^u = 331,6 \text{ кг·мм} .$

Находим изгибающие моменты относительно главных осей (X и Y), для чего требуется предварительно найти угол α_2 .

Так как для заполнения расчетного листа (табл.15) ось X_1 выбрали параллельно линии, проходящей через центры входной и выходной кромок, то

$$\alpha_2 = \gamma + \alpha_{\text{табл}}$$

$$\alpha_2 = 59^\circ + 0^\circ 36' = 59^\circ 36' .$$

Теперь: $M_X^u = -311,25 \cdot \sin 59^\circ 36' - 331,6 \cdot \cos 59^\circ 36' = -437 \text{ кг·мм} ,$
 $= -311,25 \cdot \sin 59^\circ 36' + 331,6 \cdot \cos 59^\circ 36' = 128,5 \text{ кг·мм} .$

Определим напряжения изгиба от центробежных сил:

$$\sigma_{u_{A,B,C}}^u = \frac{M_X^u \cdot e_1}{J_m} + \frac{M_Y^u \cdot e_2}{J_{\max}}$$

Снимаем координаты точек А, В и С для корневого сечения, соблюдая правило знаков (гл.Ш, § 13).

Точка	e_2	e_1
А	- 11,6	6,2
В	0,5	- 4,2
С	25,3	5,9

Считаем напряжения изгиба:

$$\sigma_{u_A} = - 1,821 \text{ кг/мм}^2 ,$$

$$\sigma_{u_B} = 1,191 \text{ кг/мм}^2 ,$$

$$\sigma_{u_C} = - 1,632 \text{ кг/мм}^2 .$$

Считаем изгибающие моменты от сил давления газов:

$$(M_{a_{8m}}^r = 647,3 \text{ кг.мм}; \quad M_{u_{8m}}^r = - 619,37 \text{ кг.мм})$$

$$M_X^r = 647,3 \cdot \sin 59^{\circ}36' + 619,37 \cdot \cos 59^{\circ}36' = 872 \text{ кг.мм},$$

$$M_Y^r = 647,3 \cdot \cos 59^{\circ}36' - 619,37 \cdot \sin 59^{\circ}36' = -208 \text{ кг.мм}.$$

Напряжения изгиба от сил давления газов:

$$\sigma_{u_{a,b,c}}^r = \frac{M_X \cdot e_1}{J_{\min}} + \frac{M_Y \cdot e_2}{J_{\max}}$$

$$\sigma_{u_A}^r = 3,613 \text{ кг/мм}^2; \quad \sigma_{u_B}^r = -2,365 \text{ кг/мм}^2; \quad \sigma_{u_C}^r = 3,05 \text{ кг/мм}^2.$$

Находим суммарные напряжения изгиба:

$$\sigma_{\text{сум}} = \sigma_p + \sigma_{u_{\max}}^u + \sigma_{u_{\max}}^r$$

$$\sigma_{\text{сум}A} = 9,022 \text{ кг/мм}^2; \quad \sigma_{\text{сум}B} = 6,056 \text{ кг/мм}^2; \quad \sigma_{\text{сум}C} = 8,648 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}.$$

Опасной точкой является точка "А". Для нее находим запас прочности:

$$K = \frac{20}{9,022} = 2,2.$$

Считаем такой запас прочности допустимым, а лопатку спрופилированной в аэродинамическом и прочностном отношении.

II. Координирование профилей лопатки

Для координирования профилей лопатки выбираем единую систему XOU (рис.65). Ось абсцисс параллельна хорде профиля сечения $\bar{V}-\bar{U}$ и проходит через точку $C_{\bar{U}}$ - центр тяжести этого сечения. Ось ординат касается входной кромки профиля $\bar{U}-\bar{U}$ (см. рекомендации §13).

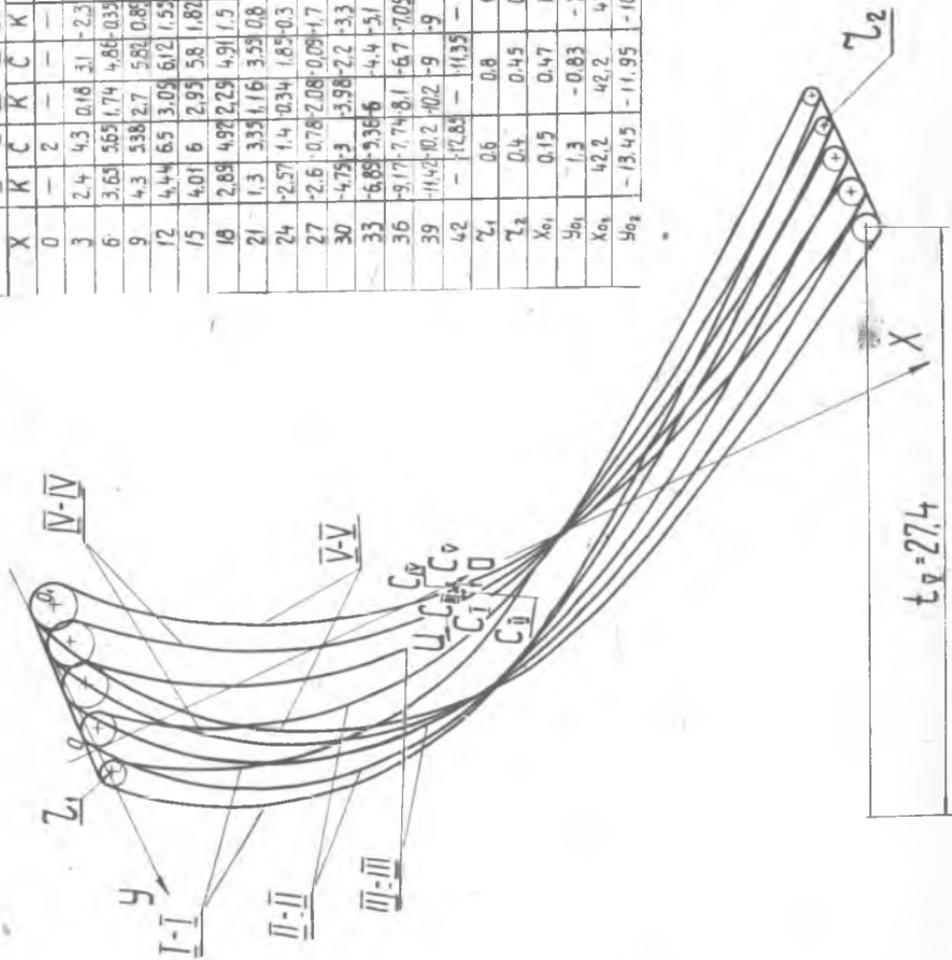
Размеры профилей достаточно велики, поэтому интервал разбивки абсцисс принимаем равным 3 мм. Соответствующие значения ординат, прежде чем их поместить в чертёж, проверяем на плавность контура (в соответствии с материалами § 15). В таблице 24 в качестве примера приведена проверка на плавность контура корыта профиля сечения П-П. Изменение координат начинаем с точек, соответствующих выходной части профиля, где плавность контура из-за больших скоростей потока имеет большее значение, чем на входных участках. Видно, что для получения контура плавным необходимо изменение ор-

Таблица 24

У	Δ	Δ ²	Δ ³	Δ ⁴
18				
	156			
174		60		
	96		3	
270		-57		1
	39		4	
309		-53		-3
	-14		1	
295		-52		4
	-66		5	
229		-47		5
	-113		10	
118		-37		3
	-150		13	
34		-24		-5
	-174		8	
208		-16		-4
	-100		4	
398		-12		0
	-202		4	
600		-8		4
	-210		6	
810		0		
	-210			
1020				

У	Δ	Δ ²	Δ ³	Δ ⁴	Сечение в-в (горы/го)
18					
	156				
174		-60			
	96		-1		
270		-61		17	17 -16 1
	33		16		
	-65		-26		-26 -1 -27 (24) -3
309		-10		-10	
	-55		13		
295		-50		5	15 4 19 1 20 -16 4
	-115		20		
229		-30		-25	15 -4 11 (-6) 5 -4 1 6 5
	-143		-5		
118		-30		-25	15 16 -7 4 -3 (6) 3
	-178		14		
34		-53		27	31 24 (24) 0 -1 -1 -4 -5
	-208		-9		
	-167		-9		
398		-16		22	(-16) 4 -4 0
	-205		13		
600		-5		-6	3 4 6
	-210		5		
810		0			
	-210				
1020					

X	I-I		II-II		III-III		IV-IV		V-V	
	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C
0	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2.4	4.3	0.16	3.1	-2.3	1.4	-4.4	0	-6.35	-1.2
6	3.65	5.65	1.74	4.86	-0.35	3.45	-2.23	2.5	-3.63	1.7
9	4.3	5.98	2.7	5.82	0.85	4.7	-0.7	4.03	-2.1	3.5
12	4.44	6.5	3.05	6.12	1.53	5.3	0.35	4.92	-0.85	4.6
15	4.01	6	2.95	5.8	1.82	5.32	0.85	5.2	-0.15	5.1
18	2.89	4.92	2.29	4.91	1.5	4.85	1.0	5.0	0.8	5.2
21	1.3	3.35	1.16	3.53	0.8	3.9	0.6	4.25	0.25	4.7
24	-2.57	1.4	-0.34	1.85	-0.3	2.55	-0.1	3.1	-0.1	3.7
27	-2.6	-0.78	-2.08	-0.09	-1.7	0.92	-1.15	1.7	-0.9	2.3
30	-4.75	-3	-3.98	-2.2	-3.3	-0.9	-2.5	0.05	-1.93	0.79
33	-6.85	-5.38	-6	-4.4	-5.1	-2.95	-4	-1.75	-3.2	-0.85
36	-9.17	-7.74	-8.1	-6.7	-7.05	-5.19	-5.61	-3.7	-4.6	-2.35
39	-11.42	-10.2	-10.2	-9	-9	-7.5	-7.4	-5.75	-6.1	-4.35
42	-12.85	-	-11.35	-	-	-	-	-	-	-
Z_1	0.6	0.8	0.8	1.05	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.1
Z_2	0.4	0.45	0.45	0.5	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.6
X_{01}	0.15	0.47	0.47	0.9	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.1
Y_{01}	1.3	-0.83	-0.83	-2.89	-4.95	-4.95	-4.95	-4.95	-4.95	-5.8
X_{02}	42.2	42.2	42.2	42.15	42.1	42.1	42.1	42.1	42.1	42.2
Y_{02}	-13.45	-11.95	-10.4	-8.65	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9



динат пяти точек. Выполненная проверка подтверждает правильность вычислений.

Таблица координат профилей всех пяти сечений, а также координаты центров окружностей кромок профилей внесены в рис.65.

Этим заканчивается проектирование пера.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г.Д.СТЕПАНОВ. Гидродинамика решеток турбомашин. Физматгиз, 1962.
2. М.И.ЛУКОВСКИЙ. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашинах. "Машиностроение", Л., 1967.
3. К.В.ХОЛЩЕВНИКОВ, О.Н.ЕМИН. Выбор параметров и расчет авиационных газовых турбин. Руководство по курсовому и дипломному проектированию. МАИ, 1967.
4. Г.Ю.СТЕПАНОВ. Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей. Mashgiz, 1958.
5. В.Х.АБИАНЦ. Теория авиационных газовых турбин реактивных двигателей. "Машиностроение", 1965.
6. *Strom Ernst. Schaufelprofil für Turbinen, ins besondere Dampf-turbinen*, №853754, Klasse 14 с Gruppe 11а, 1952. Патент ФРГ.
7. Б.С.СТЕЧКИН, П.К.КАЗАНДЖАН и др. Теория реактивных двигателей (лопаточные машины). Оборонгиз, 1956.
8. В.ТРАУПЕЛЬ. Тепловые турбомашини. Госэнергоиздат, 1961.
9. Б.М.АРОНОВ. Некоторые вопросы проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей. Труды КуАИ, вып.45 (в производстве).
10. М.Е.ДЕЙЧ. Техническая газодинамика. Госэнергоиздат, 1961.
11. М.Е.ДЕЙЧ, Г.С.САМОЙЛОВИЧ. Основы аэродинамики осевых турбомашин. Mashgiz, 1959.
12. Б.М.АРОНОВ, Б.И.МАМАЕВ. Сборник "Теплофизика и теплотехника". Изд. "Наукова думка", Киев, 1964.
13. Б.М.АРОНОВ. "Авиационная техника", ИВУЗ, 1965, № 4.
14. Г.С.ЖИРИЦКИЙ и др. Газовые турбины авиационных двигателей. Оборонгиз, 1963.
15. С.З.КОПЕЛЕВ и др. Сборник "Производство лопаток двигателей". Оборонгиз, 1957.
16. А.А.САВЕЛОВ. Плоские кривые. Физматгиз, 1960.
17. И.А.БИРГЕР. Расчет лопаток на прочность. Руководство для конструкторов по расчету на прочность газотурбинного двигателя. Оборонгиз, 1956.
18. *Gordes G. Strömungstechnik des gasbeaufschlagten Axialturbinen. Berlin (Göttingen). Heidelberg. Springer, 1963.*
19. В.И.ФВОДОСЬЕВ. Сопротивление материалов. Физматгиз, 1963.
20. Б.И.МАМАЕВ. Газодинамический расчет осевой турбины. Учебно-методическое пособие. КуАИ, 1969.
21. А.Г.КЛЕБАНОВ. Методика расчета газовой многоступенчатой турбины. Пособие по курсовому и дипломному проектированию. Куйбышев, КуАИ, 1961.
22. М.Е.ДЕЙЧ и др. Атлас профилей решеток осевых турбин. "Машиностроение", 1965.
23. В.А.АНДРЕЕВ и др. Расчет и построение контуров самолета на плазе. Оборонгиз, 1960.