

УДК 621.438.001 2 (02)

В.М. РАДЬКО, Н.Ф. МУСАТКИН, Д.С. КАЛАБУХОВ*Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва, Российская Федерация***АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ЛОПАТОК РАБОЧИХ
КОЛЁС ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБИН**

Поставлена задача получения математической модели активных лопаток рабочих колёс центростремительных малоразмерных турбин (ЦСМТ). Приведены аналитические зависимости геометрических параметров пространственной решетки РК ЦСМТ от известной высоты на входе в РК, известных геометрических параметров плоской решетки профилей РК в кольцевом сечении и искомой высоты лопатки на выходе из РК h_2 . Приводится методика аналитического определения высоты лопатки h_2 рабочего колеса на основании геометрических параметров решетки, энергетических, кинематических и режимных параметров на входе в ступень, в рабочее колесо и на выходе из него, справедливая при степенях понижения давления $\pi_r = 1.5...10$, числах Маха $M_{w2s} = 0.8...1.4$ и Рейнольдса – $Re = (5...10) \cdot 10^5$. Описанная методика позволяет завершить процесс автоматизированного газодинамического проектирования лопаток РК ЦСМТ.

Ключевые слова: турбина центростремительная малоразмерная, колесо рабочее, высота лопатки, решётка, срез косой, интегралы эллиптические, развертка цилиндра, угол выхода потока, скорость приведенная, уравнение неразрывности, уравнение количества движения.

Введение

В работе [3] определены геометрические параметры профиля лопатки рабочего колеса (РК) центростремительной малоразмерной турбины в любом i -м кольцевом сечении (рис. 1). Для завершения создания пространственной геометрической модели при автоматизированном процессе газодинамического проектирования ЦСМТ необходимо наличие его математической модели, выражающейся в зависимости высоты лопатки от геометрических параметров плоской решётки, а также от энергетических и режимных параметров течения газа.

1. Формулирование задачи

В процессе автоматизированного проектирования необходимо получить пространственную геометрическую модель РК, зная высоту лопаток на входе в РК h_1 и на выходе из него h_2 . Величина $h_2 = h_1 \pm \Delta_n \pm \Delta_b$,

где h_c – высота сопловой лопатки (определена по [4]);

Δ_n , Δ_b – величины нижней и верхней перекрыши соответственно.

Аналитическое определение высоты лопатки h_2 , зависящей от геометрических, кинематических, режимных и энергетических параметров представляет собой сложную задачу, которую необходимо

решать поэтапно. Для ее решения необходимо:

1. Составить уравнение секущей лопатку плоскости.
2. Определить геометрические параметры лопатки в сечении к-к.
3. Выразить все неизвестные высоты лопатки в области косого среза и на выходе из решетки через высоту h_2 и известные геометрические параметры плоской решетки, записать выражения для площадей образующих лопатки в области косого среза и площади поперечного сечения горла канала.
4. Определить газодинамические параметры решётки в относительном движении потока газа.
5. Составить необходимые уравнения газовой динамики для определения высоты h_2 .

2. Решение задачи**2.1. Уравнение секущей плоскости**

Меридиональный угол уширения лопатки

$$\gamma = \arctg \left[\frac{h_2 - h_1}{(R_1 - r_1) \cos \alpha + r_1 - (R_2 + r_2) \cos \frac{\theta}{2} + r_2} \right].$$

Уравнение секущей плоскости имеет вид:

$$\frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1,$$

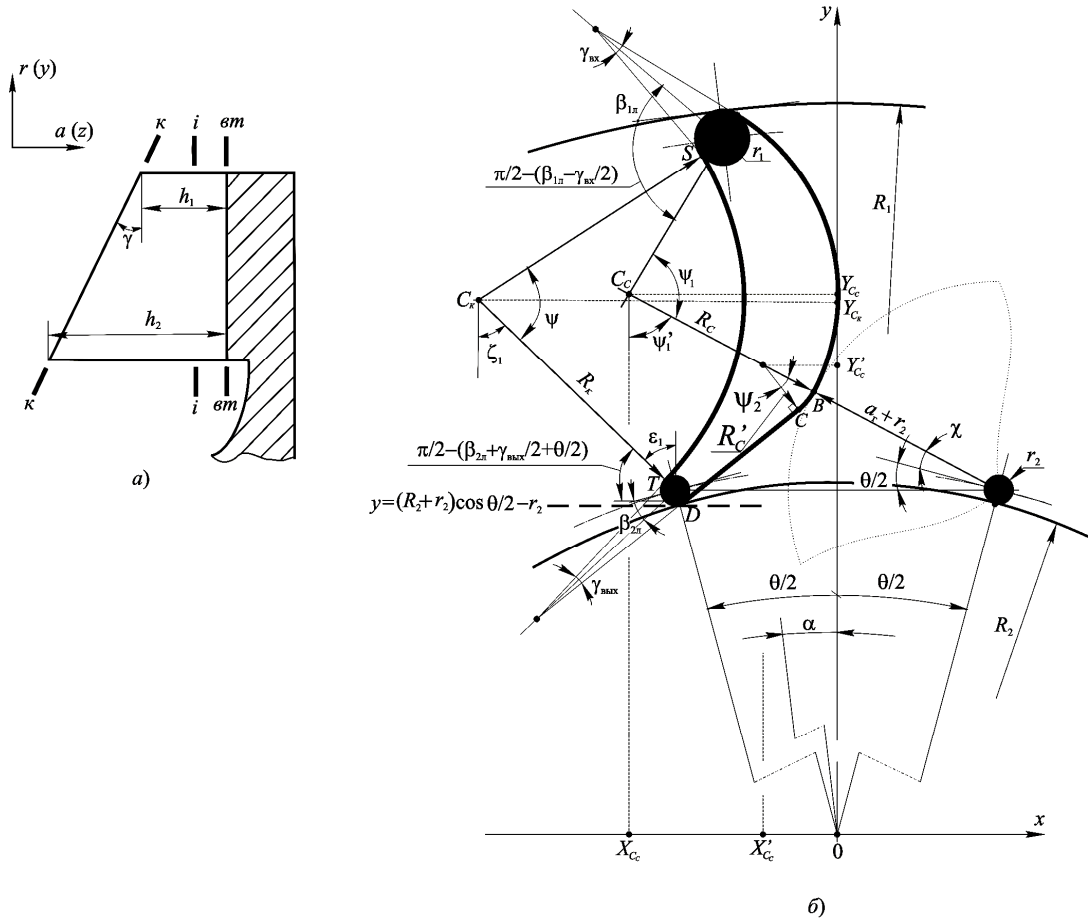


Рис. 1. Активная лопатка РК ЦСМТ:
 а – лопатка в меридиональном сечении; б – профиль лопатки в i-м сечении

где $b = h_2 \operatorname{ctg} \gamma + (R_2 + r_2) \cos \frac{\theta}{2} - r_2$;

$$c = h_2 + \left[(R_2 + r_2) \cos \frac{\theta}{2} - r_2 \right] \operatorname{tg} \gamma.$$

2.2. Определение геометрических параметров лопатки в сечении k-k

В сечении k-k профиль активной лопатки РК образован сопрягающимися дугами эллипсов, длины которых определяются с помощью эллиптических интегралов второго рода. Известно [1], что длина дуги эллипса выражается формулой

$$l = a \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sqrt{1 - t^2 \sin^2 \phi} \, d\phi = a \left(\int_0^{\phi_2} \sqrt{1 - t^2 \sin^2 \phi} \, d\phi - \int_0^{\phi_1} \sqrt{1 - t^2 \sin^2 \phi} \, d\phi \right) = a [E(\phi_2, t) - E(\phi_1, t)],$$

где $t = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ – эксцентриситет эллипса, а и b – полуоси эллипса ($a > b$).

Тогда длины образующих лопатки

$$l_{PB} = \frac{R'_C}{\cos \gamma} [E(\psi_1'', t) - E(\psi_1', t)];$$

$$l_{BC} = \frac{R_C}{\cos \gamma} [E(\psi_2'', t) - E(\psi_2', t)];$$

$$l_{SP} = \frac{r_1}{\cos \gamma} [E(\xi_2, t) - E(\xi_1, t)];$$

$$l_{ST} = \frac{R_K}{\cos \gamma} [E(\zeta_2, t) - E(\zeta_1, t)];$$

В этих выражениях

$$t = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma};$$

$$\psi_1' = \frac{\pi}{2} - \chi - \frac{\theta}{2}, \psi_1'' = \psi_1 + \psi_1';$$

$$\psi_2' = \psi_2'' - \psi_2, \psi_2'' = \psi_1';$$

$$\xi_1 = \psi_1 + \psi_1', \xi_2 = \xi_1 + \pi - \gamma_{\text{ВВХ}};$$

$$\varepsilon_1 = \beta_{2n} + \frac{\gamma_{\text{ВВХ}}}{2} + \frac{\theta}{2}, \varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \pi - \gamma_{\text{ВВХ}};$$

$$\zeta_1 = \varepsilon_1, \zeta_2 = \zeta_1 + \psi.$$

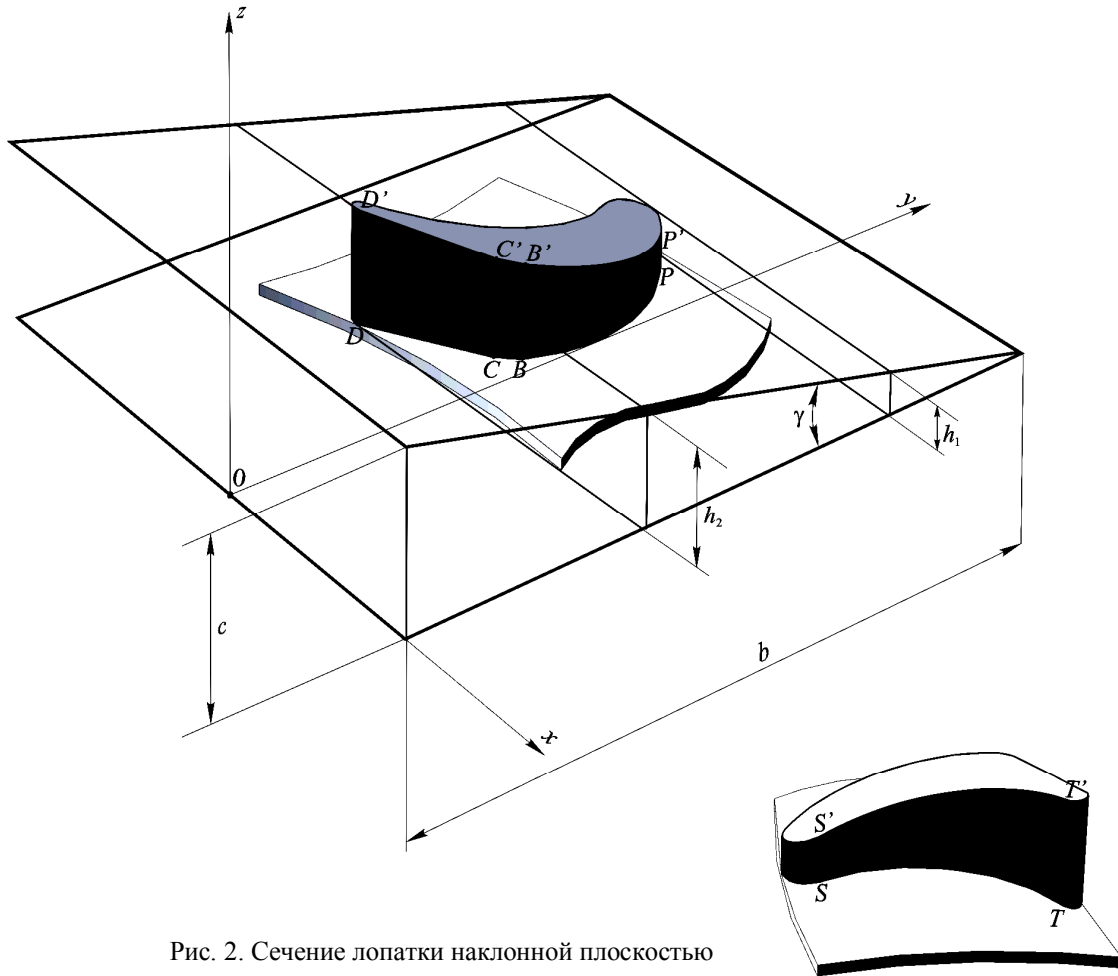


Рис. 2. Сечение лопатки наклонной плоскостью

2.3. Определение площадей, образующих лопатки поверхностей в области косо́го среза, и площади поперечного сечения горла канала

В дальнейшем, при составлении системы уравнений для определения высоты лопатки h_2 необходимо иметь зависимости площадей поверхностей, на которые действуют давления потока в области косо́го среза от самой высоты этой лопатки.

Лопатку можно представить как систему сопряженных поверхностей усеченных цилиндров с радиусами нижних оснований r_1, R_C, R'_C, R_K, r_2 и трапеции $CDD'C'$ (рис. 3).

Площадь $CDD'C'$:

$$F_{CDD'C'} = \frac{h_D + h_x}{2} CD,$$

$$\text{где } h_D = r_2 \operatorname{tg} \gamma \left[\cos \left(\beta_{2л} - \frac{\gamma_{\text{ВЫХ}}}{2} + \frac{\theta}{2} \right) - 1 \right] + h_2;$$

$$h_x = R'_C \operatorname{tg} \gamma (\cos \psi'_2 - 1) + h_2 - f \operatorname{tg} \gamma.$$

В то же время

$$h_x = h_D - CD \operatorname{tg} \delta.$$

Тогда

$$\delta = \arctg \left[\left(h_D - h_2 + f \operatorname{tg} \gamma - R'_C \operatorname{tg} \gamma (\cos \psi'_2 - 1) \right) / CD \right].$$

Длина стенки косо́го среза в сечении к-к:

$$C'D' = \frac{CD}{\cos \delta}.$$

Площади $CBV'C'$ и $ADD'A'$ определяются с помощью развёрток условных усеченных цилиндров на плоскость (рис. 3, в, г).

Площадь $CBV'C'$:

$$F_{CBV'C'} = \int_{R'_C \psi_2'}^{R'_C \psi_2''} [p \cos(x/R'_C) + q] dx = qR'_C \psi_2 + pR'_C (\sin \psi_2'' - \sin \psi_2'),$$

где $p = R'_C \operatorname{tg} \gamma$; $q = h_2 - (f + R'_C) \operatorname{tg} \gamma$.

Площадь $ADD'A'$:

$$F_{ADD'A'} = \int_{-r_2(\beta_{2л} - \gamma_{\text{ВЫХ}}/2 + \theta/2)}^{r_2(\pi/2 + \chi - \theta/2)} [u \cos(x/r_2) + v] dx = v r_2 \mu + u r_2 \left[\sin(\pi/2 + \chi - \theta/2) + \sin(\beta_{2л} - \gamma_{\text{ВЫХ}}/2 + \theta/2) \right],$$

где $u = r_2 \operatorname{tg} \gamma$; $v = h_2 - r_2 \operatorname{tg} \gamma$.

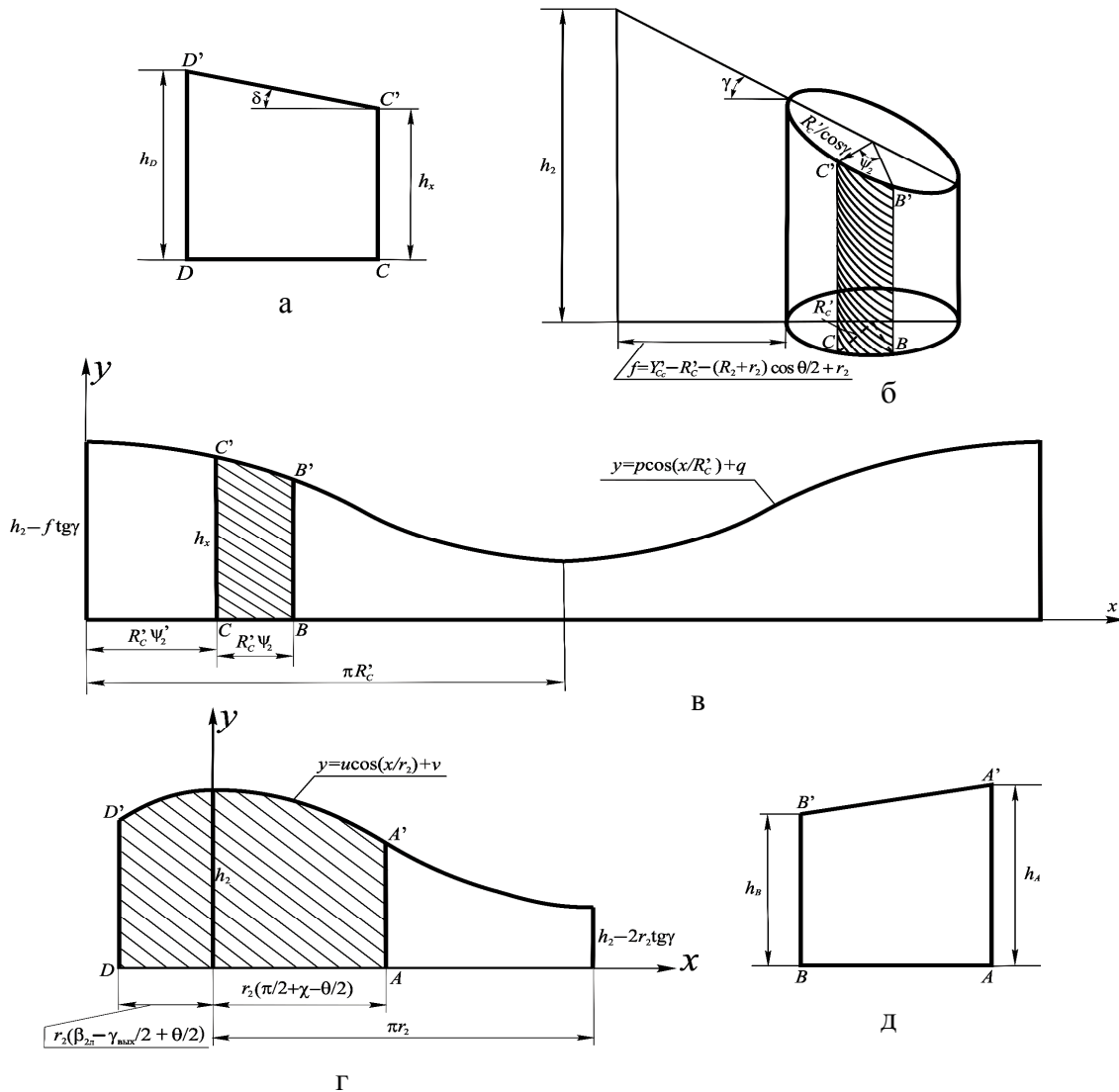


Рис. 3. К определению площадей в области косо́го среза

а – стенка косо́го среза CDD'C'; б – условный усеченный цилиндр с нижним основанием радиусом R_c' ; в – развёртка условного усеченного цилиндра для определения площади CBB'C'; г – развёртка цилиндра с нижним основанием радиусом r_2 для определения площади ADD'A'; д – горло межлопаточного канала ABB'A'

$$\text{Площадь горла } ABB'A' \quad F_{ABB'A'} = \frac{h_A + h_B}{2} a_\Gamma,$$

$$\text{где } h_A = r_2 \operatorname{tg} \gamma \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} + \chi - \frac{\theta}{2} \right) - 1 \right] + h_2;$$

$$h_B = R_c' \operatorname{tg} \gamma \left(\cos \psi_2'' - 1 \right) + h_2 - f \operatorname{tg} \gamma.$$

2.4. Физическая модель течения в косо́м срезе межлопаточного канала и на выходе из решётки. Определение параметров потока в относительном движении

На рис. 4 изображен межлопаточный канал решётки РК ЦСМТ и схема изоэнтропического течения газа в пределах косо́го среза и на выходе из него

(выделенный контур AA'BB'CC'DD'EE'FF'GG') в относительном движении. Все основные условия и допущения описаны в [6]. Они пригодны не только для сопловых решёток, но также и для рабочих при рассмотрении относительного движения. Тем не менее, основным отличием представленной физической модели от описанных в [4] и [6] является её пространственный характер. Известно [5], что в РК ЦСМТ происходит отбрасывание потока в сторону крышки РК вследствие взаимодействия кориолисовых, центробежных сил и сил давления газа, поэтому в сечении горла (г-г) канала линии тока находятся под углом $\varpi_{\Gamma S}$, а за решёткой (сечение 2'-2') – под углом ϖ_{2S} к плоскости уг. Кроме этого, как и в [4] полагается, что в сечении г-г вектор средней

скорости $w_{r(ur)s}$ направлен под углом χ' к горлу решётки.

Давление на стенку $CBB'C'$ приближенно принято равным давлению p_r , давление на стенку

$CDD'C'$ косоуго среза – среднеарифметическому давлению $(p_a + p_2)/2$, давление за этой стенкой соответственно p_2 , а давление на кромку $AEE'A'$ ($ADD'A'$)

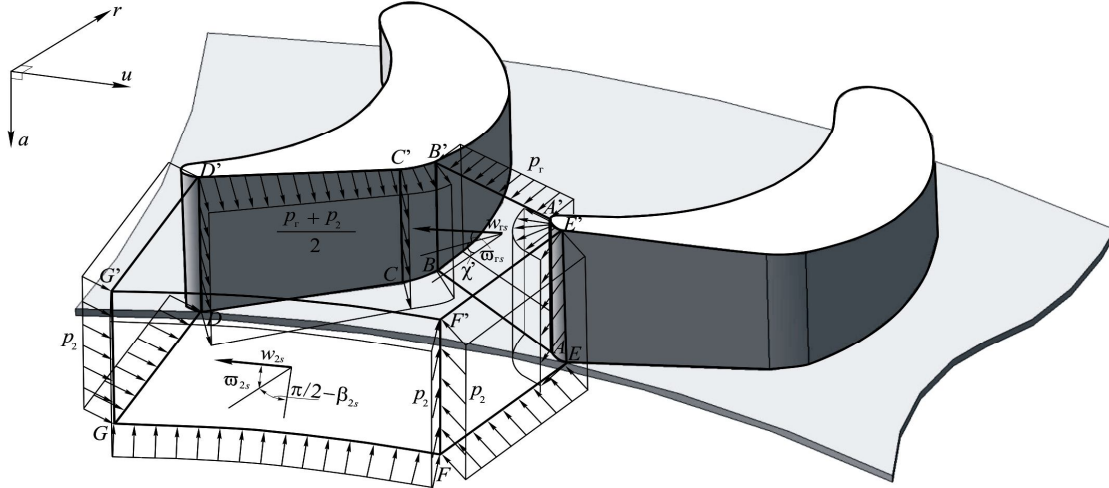


Рис. 4. Физическая модель течения в косом срезе межлопаточного канала и на выходе из решетки (дозвуковое течение)

$$\frac{1}{\mu} \int_0^{\mu} \left(p_r + \frac{p_2 - p_r}{\mu} \mu_i \right) d\mu_i = \frac{p_r + p_2}{2} \quad (\text{см. рис. 5}).$$

Исходными данными для решения поставленной задачи являются расход газа через турбину G_s , степень понижения давления π_r (давление p_2), число оборотов ротора n , число Маха M_{1s} (скорость c_{1s}), степень парциальности турбины ε , геометрические параметры решетки РК, высота лопатки на входе в РК $h_{1(s)}$, угол выхода потока из СА α_{1s} . Используя известные теоретические выражения [2], определяем необходимые для расчета параметры потока:

$$u_1, u_2, \lambda_{w1s}, T_{w1}^*, \beta_{1s}, \lambda_{w2s}, T_{w2}^*, P_{w2s}^*.$$

Кроме перечисленных параметров, необходимо также определить величину температуры заторможенного потока в относительном движении в горле канала T_{wg}^* . На рис. 5 показано распределение давления p_{wgs}^* (аналогично и скорости $w_{r(ur)s} \cos \chi'$) по длине горла в кольцевом сечении решетки. Такой характер распределения давления p_{wgs}^* может быть вызван изменением переносной скорости u по длине горла канала. Поскольку закон вышеописанных распределений близок к линейному, то средняя переносная скорость

$$u_r = \frac{\pi n R_r}{30},$$

где

$$R_r = \sqrt{(R_2 + r_2)^2 + \left(\frac{a_r}{2} + r_2\right)^2} + 2(R_2 + r_2) \left(\frac{a_r}{2} + r_2\right) \sin \chi.$$

Температура T_{wg}^* определяется по формуле

$$T_{wg}^* = T_{w1}^* - \frac{u_1^2 - u_r^2}{2C_p} \quad \text{или} \quad T_{wg}^* = T_{w2}^* + \frac{u_r^2 - u_2^2}{2C_p}.$$

При необходимости можно определить среднее давление P_{wgs}^* в горле:

$$P_{wgs}^* = P_{w2s}^* \left(\frac{T_{wg}^*}{T_{w2}^*} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

2.5. Составление уравнений движения газа

Кроме искомой высоты лопатки h_{2s} неизвестными параметрами являются приведенная скорость в горле λ_{wgs} , углы β_{2s} , ϖ_{rs} , ϖ_{2s} .

Уравнение неразрывности для входного сечения 1-1 и сечения горла г-г:

$$\begin{aligned} \rho_{1s} w_{1s} R_1' \theta h_{1s} \sin \beta_{1s} &= \\ &= \rho_{as} w_{as} F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos \varpi_{as} \end{aligned}$$

преобразуем так, чтобы оно содержало геометрические и безразмерные газодинамические параметры и функции:

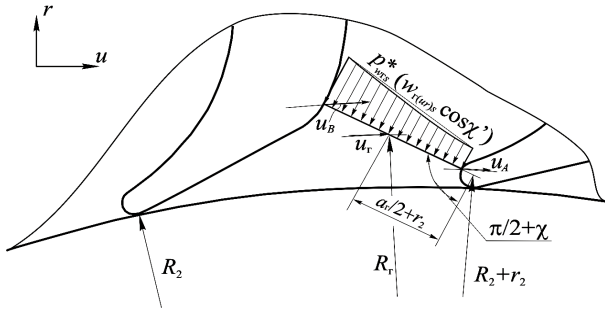


Рис. 5. К определению T_{w1}^*

$$\left(\frac{T_{w1}^*}{T_{w1}^*}\right)^{2(k-1)} q(\lambda_{w1s}) R_1' \theta h_{1s} \sin \beta_{1s} = \quad (1)$$

$$= q(\lambda_{w1s}) F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos \varpi_{rS}$$

Аналогично записывается уравнение неразрывности для сечений $\Gamma-\Gamma$ и $2'-2'$:

$$\varepsilon(\lambda_{w2s}) \lambda_{w2s} F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos \varpi_{rS} = \quad (2)$$

$$= \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{w1}^*}\right)^{2(k-1)} q(\lambda_{w2s}) R_2' \theta h_{2s} \sin \beta_{2s} \cos \varpi_{2s}$$

Уравнение количества движения на ось u представим в виде:

$$-\frac{2}{k+1} \varepsilon(\lambda_{w2s}) \lambda_{w2s}^2 F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos^2 \varpi_{rS} \sin \left(\chi + \frac{\theta}{2} + \chi'\right) - \frac{\pi(\lambda_{w2s})}{k} \left[F_{ABB'A'} \sin \left(\chi + \frac{\theta}{2}\right) - A - \frac{1}{2} F_{CDD'C'} \times \right.$$

$$\left. \times \cos \left(\chi + \frac{\theta}{2} + \psi_2\right) \right] - B + \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{w1}^*}\right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{\pi(\lambda_{w2s})}{k} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{2} F_{CDD'C'} \cos \left(\chi + \frac{\theta}{2} + \psi_2\right) + h_D EF [\cos \tau - \right.$$

$$\left. - \cos(\tau + \theta)] \right] = -\frac{4}{k+1} \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{w1}^*}\right)^{\frac{k}{k-1}} \varepsilon(\lambda_{w2s}) \lambda_{w2s}^2 \times$$

$$\times \sin \beta_{2s} \cos^2 \varpi_{2s} R_2' h_{2s} \sin \frac{\theta}{2} \sin(\theta + \varphi) +$$

$$+ 2 \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{w1}^*}\right)^{\frac{k}{k-1}} \times \frac{\pi(\lambda_{w2s})}{k} R_2' h_{2s} \sin \frac{\theta}{2} \sin(\theta + \varphi + \beta_{2s}). \quad (3)$$

Аналогично уравнение количества движения на ось a :

$$\varepsilon(\lambda_{w2s}) \lambda_{w2s}^2 F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos \varpi_{rS} \sin \varpi_{rS} = \quad (4)$$

$$= \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{w1}^*}\right)^{\frac{k}{k-1}} \varepsilon(\lambda_{w2s}) \lambda_{w2s}^2 R_2' h_{2s} \sin \beta_{2s} \cos \varpi_{2s} \sin \varpi_{2s}$$

Выражение для определения высоты лопатки, записанное с помощью уравнения расхода газа:

$$h_{2s} = \frac{G_s \sqrt{T_{w2}^*}}{\varepsilon \cdot m \cdot p_{w2}^* \cdot \pi D_2 \cdot q(\lambda_{w2s}) \sin \beta_{2s} \cos \varpi_{rS}} \quad (5)$$

В уравнениях (1-4):

$$\chi' = \frac{\frac{\pi}{2} - \chi - \beta_{2л} - \frac{\gamma_{ВЫХ}}{2}}{2};$$

$$EF = \sqrt{R_2'^2 + R_D^2 - 2R_2'R_D \sin(\beta_{2s} + \varphi)},$$

$$\tau = \theta - \frac{\theta}{2} + \varphi,$$

$$\theta = \arcsin \left[\frac{r_2}{R_D} \sin \left(\beta_{2л} - \frac{\gamma_{ВЫХ}}{2} \right) \right],$$

$$R_D = \sqrt{(R_2 + r_2)^2 + r_2^2 - 2(R_2 + r_2)r_2 \cos \left(\beta_{2л} - \frac{\gamma_{ВЫХ}}{2} \right)},$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{R_2'}{R_D} \cos \beta_{2s} \right),$$

$$R_2' \approx 1,005R_2 \div 1,05R_2;$$

$$A = \int_0^{\psi_2} F_{iCBB'C'} \cos \left(\chi + \frac{\theta}{2} + \psi_{2i} \right) d\psi_{2i} = \int_0^{\psi_2} [qR_C' \psi_{2i} +$$

$$+ pR_C' (\sin \psi_2'' - \sin(\psi_2'' - \psi_{2i}))] \times$$

$$\times \cos \left(\chi + \frac{\theta}{2} + \psi_{2i} \right) d\psi_{2i};$$

$$B = \frac{1}{k} \int_0^{\mu} F_{iAEE'A'} v_i \cos \left(\chi + \frac{\theta}{2} - \mu_i \right) d\mu_i = \int_0^{\mu} \{ v_{r2} \mu_i +$$

$$+ u_{r2} [\sin(\mu_i - (\beta_{2л} - \gamma_{ВЫХ} / 2 + \theta / 2)) +$$

$$+ \sin(\beta_{2л} - \gamma_{ВЫХ} / 2 + \theta / 2)] \} v_i \cos \left(\chi + \frac{\theta}{2} - \mu_i \right) d\mu_i,$$

$$v_i = \pi(\lambda_{w2s}) + \frac{\pi(\lambda_{w2s}) \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{w1}^*} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \pi(\lambda_{w2s})}{\mu} \mu_i.$$

$\pi(\lambda_{wis})$, $\varepsilon(\lambda_{wis})$, $q(\lambda_{wis})$ – хорошо известные газодинамические функции давления, плотности и плотности тока соответственно. При совместном решении уравнений (1-5) определяется искомая величина лопатки на выходе из РК h_{2s} .

Приведенная в статье методика определения высоты лопатки справедлива при степенях понижения давления $\pi_r = 2 \dots 10$, числах Маха $M_{w2s} = 0,8 \dots 1,4$ и Рейнольдса $Re = (5 \dots 10) \cdot 10^5$. В случае сверхзвукового истечения из РК в горле канала устанавливается критический режим, т.е. $M_{w2s} = \lambda_{w2s} = 1$. Очевидно, что в этом случае отпадает необходимость в одном из уравнений, например (1).

Поскольку слияние струй из соседних каналов происходит на радиусе $R_2' \approx 1,005R_2 \div 1,05R_2$, то

уравнение (3) можно значительно упростить, полагая, что $R_2' = R_2$ (это приближение несущественно сказывается на точности вычислений), тогда

$$EF = 0; \varphi = \frac{\pi}{2} - \beta_{2s}.$$

2.6. Определение высоты лопатки на выходе из РК при реальном процессе течения газа

После отыскания неизвестных изоэнтропических величин можно определить высоту лопатки, построенной по параметрам реального потока с потерями энергии.

В данном случае неизвестными параметрами, подлежащими определению, являются высота h_2 и углы β_2 , ϖ_r , ϖ_2 , что предполагает необходимость в четырёх уравнениях движения газа.

В соответствующие выражения уравнений (2-5) нужно добавить коэффициенты скорости ψ_{1-r} и ψ_{r-2} , коэффициенты восстановления давления $\sigma_{1-r} = f(k, \psi_{1-r})$ и $\sigma_{r-2} = f(k, \psi_{r-2})$, коэффициенты расхода газа $\mu_{1-r} = f(\sigma_{1-r}, \psi_{1-r})$, $\mu_{r-2} = f(\sigma_{r-2}, \psi_{r-2})$, а также коэффициент скорости в СА φ_{CA} .

Уравнение (1) представляется в следующем виде:

$$\left(\frac{T_{w1}^*}{T_{wT}^*} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} q(\lambda_{w1}) R_1' \theta h_1 \sin \beta_1 = \quad (1a)$$

$$= \mu_{1-r} \sigma_{1-r} q(\lambda_{wT}) F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos \varpi_r.$$

Аналогичным образом преобразовывается и уравнение (2):

$$q(\lambda_{wT}) F_{ABB'A'} \cos \chi' \cos \varpi_r = \quad (2a)$$

$$= \mu_{r-2} \sigma_{r-2} \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{wT}^*} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} q(\lambda_{w2}) R_1' \theta h_2 \sin \beta_2.$$

В уравнениях (3) и (4) безразмерные газодинамические комплексы преобразовываются следующим образом:

$$\frac{2}{k+1} \varepsilon(\lambda_{wTs}) \lambda_{wTs}^2 \rightarrow \frac{2}{k+1} \varepsilon(\lambda_{wT}) \lambda_{wT}^2;$$

$$\frac{\pi(\lambda_{wTs})}{k} \rightarrow \frac{\sigma_{1-r} \pi(\lambda_{wT})}{k};$$

$$\left(\frac{T_{w2}^*}{T_{wT}^*} \right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{\pi(\lambda_{w2s})}{k} \rightarrow \sigma_{r-2} \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{wT}^*} \right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{\pi(\lambda_{w2})}{k};$$

$$\frac{2}{k+1} \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{wT}^*} \right)^{\frac{k}{k-1}} \varepsilon(\lambda_{w2s}) \lambda_{w2s}^2 \rightarrow \sigma_{r-2} \frac{2}{k+1} \times$$

$$\times \left(\frac{T_{w2}^*}{T_{wT}^*} \right)^{\frac{k}{k-1}} \varepsilon(\lambda_{w2}) \lambda_{w2}^2.$$

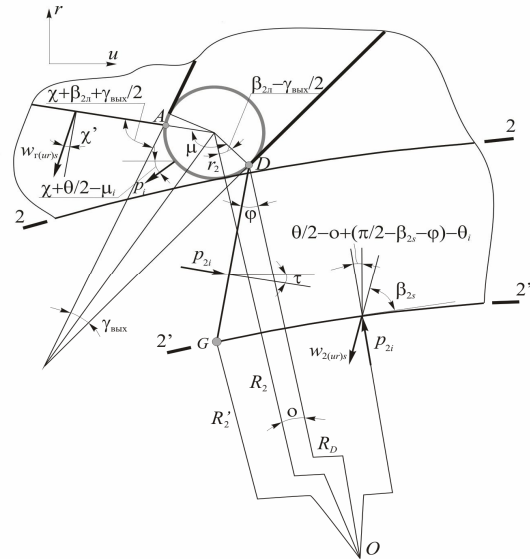


Рис. 6. К определению геометрии потока на выходе из РК

В этих выражениях

$$\lambda_{wT} = \varphi_{CA} \psi_{1-r} \lambda_{wTs};$$

$$\lambda_{w2} = \varphi_{CA} \psi_{1-r} \psi_{r-2} \lambda_{w2s} = \varphi_{CA} \psi_{PK} \lambda_{w2s}.$$

Как минимум два коэффициента одного типа должны определяться опытным путем, либо их значения принимаются по статистическим данным.

Величины h_1 и α_1 (а, следовательно, и β_1) определяются по методике, изложенной в [4].

Заключение

В настоящей статье приведены аналитические зависимости геометрических параметров пространственной решетки РК ЦСМТ от известной высоты лопатки на входе в РК, известных геометрических параметров плоской решетки профилей РК в кольцевом сечении и искомой высоты лопатки на выходе из РК h_2 .

Приводится методика аналитического определения высоты лопатки h_2 рабочего колеса на основании геометрических параметров как плоской, так и пространственной решетки, энергетических, кинематических и режимных параметров на входе в ступень, в рабочее колесо и на выходе из него, справедливая при степенях понижения давления $\pi_r = 2 \dots 10$, числах Маха $M_{w2s} = 0.8 \dots 1.4$ и Рейнольдса $Re = (5 \dots 10) \cdot 10^5$.

Кроме того, решение уравнений (1–5) позволяет аналитически определить углы выхода потока из решетки ϖ_2 и β_2 (а, следовательно, и α_2), знание которых довольно ценно при отыскании оптимальных характеристик выходного устройства.

Описанная методика позволяет завершить процесс автоматизированного газодинамического проектирования лопаток РК ЦСМТ, а совместно с методикой определения высоты лопатки соплового ап-

парата [4] завершает процесс автоматизированного газодинамического проектирования ступени ЦСМТ.

Литература

1. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
2. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центробежной турбины / В.Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1966. – 199 с.
3. Мусаткин Н.Ф. Определение геометрических параметров рабочих колес активных центробежных турбин / Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радько,

А.Д. Балахонов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 4. – С. 113-117.

4. Радько В.М. Аналитическое определение высоты лопаток сопловых венцов центробежных малоразмерных турбин / В.М. Радько, Н.Ф. Мусаткин, Д.С. Калабухов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №8. – С. 40-46.

5. Тихонов Н.Т. Влияние некоторых конструктивных параметров на работу центробежной воздушной микротурбины / Н.Т. Тихонов // *Труды КуАИ*. – Куйбышев, 1965. – № 22. – С. 56-62.

6. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины / А.С. Наталевич. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.

Поступила в редакцию 27.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук А.А. Маркин, ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара, Российская Федерация.

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ЛОПАТОК РОБОЧИХ КОЛІС ДОЦЕНТРОВИХ МАЛОРАЗМЕРНИХ ТУРБІН

В.М. Радько, М.Ф. Мусаткін, Д.С. Калабухов

Поставлено завдання отримання математичної моделі активних лопаток робочих коліс доцентрових малорозмірних турбін (ДМТ). Приведена аналітична залежність геометричних параметрів просторових ґрат РК ЦСМТ від відомої висоти на вході в РК, відомих геометричних параметрів плоских ґрат профілів РК в кільцевому перетині і шуканої висоти лопатки на виході з РК h_2 . Приводиться методика аналітичного визначення висоти лопатки h_2 робочого колеса на підставі геометричних параметрів ґрат, енергетичних, кінематичних і режимних параметрів на вході в ступінь, в робоче колесо і на виході з нього, справедлива при ступенях пониження тиску $\pi_\tau = 1.5 \dots 10$, числах Маху $M_{w2s} = 0.8 \dots 1.4$ і Рейнольдса – $Re = (5.10) \cdot 10^5$. Описана методика дозволяє завершити процес автоматизованого газодинамічного проектування лопаток РК ДМТ.

Ключові слова: турбіна доцентрова малорозмірна, колесо робоче, висота лопатки, ґрати, зріз косий, інтеграли еліптичні, розгортка циліндра, кут виходу потоку, швидкість приведена, рівняння нерозривності, рівняння кількості руху.

ANALYTICAL DECISION OF HEIGHT OF SHOULDER-BLADES WORKING WHEELS OF CENTRIPETAL LITTLESIZES TURBINES

V.M. Radko, N.F. Musatkin, D.S. Kalabuhov

The problem of receipt of mathematical model of active shoulder-blades of driving wheels of centripetal little sizes turbines (CLT) is set. Analytical dependences of geometrical parameters of the spatial DW CLT grate are resulted on the known height on the entrance in DW, known geometrical parameters of flat grate of the DW types in the circular section and height of shoulder-blade sought after on exit from DW h_2 . The method of analytical decision of height of shoulder-blade of h_2 driving wheel on the basis of geometrical parameters of grate is led, power, kinematics and regime parameters on the entrance in feet, in the driving wheel and on exit from it, just at the degrees of decompressing $\pi_\tau = 1.5 \dots 10$, numbers of the Mach $M_{w2s} = 0.8 \dots 1.4$ and Reynol'ds – $Re = (5 \dots 10) \cdot 10^5$. The described method allows completing a process of the automated gazodinamicks planning of shoulder-blades DW CLT.

Key words: a turbine is centripetal little size, driving weel, height of shoulder-blade, grate, cut by a scythe, the integrals are elliptic, involutes of cylinder, corner of return of thread, speed is resulted, equalization of indissolubility, equalization of quantity of motion.

Радько Владислав Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (СГАУ), Самара, Российская Федерация, e-mail: rvdvig@ssau.ru.

Мусаткин Николай Федорович – канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (СГАУ), Самара, Российская Федерация.

Калабухов Дмитрий Сергеевич – студент 5 курса факультета инженеров воздушного транспорта Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (СГАУ), Самара, Российская Федерация, e-mail: steam_dk@mail.ru.