УДК 621.165

О.Н. СЛАБЧЕНКО, канд. техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»

К ОДНОМЕРНОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ[*]

В статье показано, что наибольшее значение КПД идеальной ступени, в зависимости от принятых ограничений, может быть достигнуто как при осевом выходе потока, так и при некоторой закрутке выходящего потока.

Ключевые слова: турбина, ступень, параметры, КПД, осевой выход потока.

Введение. В монографиях и учебниках, посвященных осевым турбинам, как правило, рассматривается одномерная теория идеальной турбинной ступени. Изучение таких идеализированных ступеней существенно упрощает выявлять влияние отдельных факторов на характеристики ступени. При небольших профильных потерях окружной КПД изолированной ступени почти полностью определяется потерей кинетической энергии с выходной скоростью. В этих случаях выводы теории для идеальной ступени, в определенной степени, могут переноситься и на реальные ступени. Однако, что касается выводов, приведенных в литературе относительно оптимальных параметров ступеней, то они не однозначны и порой противоречивы.

Так в [1, 2] по результатам решения только одной задачи с использованием выражения для КПД в виде

$$\eta_u = f(R = \mathrm{const},\ \alpha_1 = \mathrm{const},\ U/C_0)$$

сделан вывод, *что в идеальной осевой турбинной ступени, максимум КПД соответствует осевому выходу потока из ступени*. Из приведенного в [3] анализа зависимостей

$$\eta_u = f(R = \mathrm{const},\ \alpha_1 = \mathrm{const},\ \overline{C}_z)$$

от различных параметров идеальной ступени можно выделить постановки задач с использованием функций

$$\eta_u = f(R = \mathrm{const},\ \alpha_1 = \mathrm{const},\ U/C_0); \qquad (1)$$

$$\eta_u = f(R = \mathrm{const},\ \alpha_1 = \mathrm{const},\ \overline{C}_z); \qquad (2)$$

$$\eta_u = f(R = \mathrm{const},\ \overline{C}_z = \mathrm{const},\ \overline{C}_u), \qquad (3)$$

где $\overline{C}_z = C_z/U$, $\overline{C}_u = (C_{1u} - C_{2u})/U$, $R = h_2/[U(C_{1u} - C_{2u})]$ – кинематическая степень реактивности. Показано, что в задачах с функциями (1) и (2) максимум η_u достигается при осевом выходе потока из ступени. В задаче, где используется функция (3) максимум η_u достигается при закрутке потока за рабочим колесом против вращения. По результатам этого анализа сделан вывод: «*Очевидно, что в идеальной осевой турбинной ступени, у которой КПД определяют только потери с выходной скоростью, максимум КПД соответствует осевому выходу потока из ступени»*. Далее приводится объяснение, *что некоторое превышение КПД ступени с не осевым по сравнению с КПД ступени с осевым выходом потока, имеющей угол выхода потока из сопла* α_1 *и коэффициент расхода* $\overline{C}_z$, *объясняется увеличенным теплоперепадом на ступень. В случае приведения ступени с не осевым выходом потока к осевому выходу*

[*]) Статья публикуется в порядке дискуссии.

потока за ней при помощи правильного оптимального выбора степени реактивности, безусловно, увеличит КПД этой ступени. Указанное приведение ступени с не осевым выходом потока к ступени с осевым выходом потока возможно только при других значениях принятых ограничений $\left(\overline{C}_z, R, \alpha_1\right)$, что приводит к некорректности сравниваемых постановок задач. Кроме того, в [1–3] функция (1) подается как зависимость КПД от U/C_0 конкретной ступени, но это неверно. Эта функция представляет собой множество значений η_{ui} разных ступеней с отличающимися углами β_2.

В [4] проводится анализ другой постановки задачи, в которой при фиксированных η_u и R рассматривается зависимость коэффициента нагрузки $\psi = (C_{1u} - C_{2u})/U$ от коэффициента расхода $\varphi = C_z/U$ и оценивается значения ψ и φ, соответствующие максимальному КПД В этом случае используется уравнение $\psi = f(\eta_u = \text{const}, R = \text{const}, \varphi)$. Из анализа полученных результатов сделан вывод: «*Если величина* φ *конечная, максимальный адиабатический КПД достигается при наличии на выходе из ступени некоторого обратного вихря* ($\alpha_2^* < 90°$). *Закрутка потока на выходе отсутствует* ($\alpha_2 = 90°$) *если* φ *стремится к нулю*».

В [5] автор утверждает: «*На первый взгляд может оказаться, что максимальный КПД достигается при* $\alpha_2 = 90°$, *но это не правильно. Для некоторой обратной закрутки выходящего потока (т.е.* $\alpha_2^* < 90°$*) производимая работа увеличивается при относительно малом возрастании потери кинетической энергии на выходе*». Такой вывод сделан по результатам решения двух задач с использованием уравнений $\eta_u = f(\varphi = \text{const}, R = \text{const}, \alpha_2)$ и $\eta_u = f(\varphi = \text{const}, \alpha_1 = \text{const}, \alpha_2)$. В первой задаче максимум η_u достигается при отклонение потока за рабочим колесом от осевого на угол α_1, а во второй задаче на $\alpha_1/2$. Это различие, как указывает автор, является, главным образом, следствием различных ограничений в этих задачах.

Цель исследования, постановка задачи. Из приведенного обзора учебников и монографий видно, что существуют разные мнения относительно оценок максимального КПД идеальной ступени и параметров, при которых этот КПД достигается. Выясним причины столь неоднозначных выводов.

Для простоты, как и в [1–3], примем равными осевые $C_{1z} = C_{2z} = C_z$ и окружные $U_1 = U_2 = U$ скорости. Рабочий процесс изоэнтропийный, рис. 1.

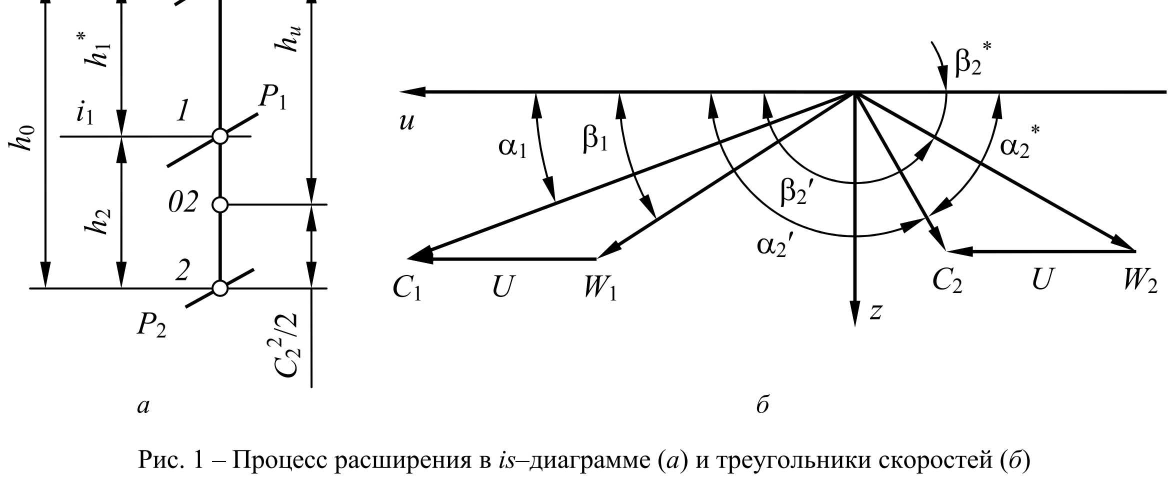

Рис. 1 – Процесс расширения в *is*–диаграмме (*а*) и треугольники скоростей (*б*)

В пределах одномерной теории в качестве основных параметров ступени можно принять η_u, α_1, β_2, α_2, U/C_0, φ, ρ, где $\rho = h_2/h_0$ (рис. 1). Выражение, в которое входят α_1, β_2, U/C_0 и ρ получим из уравнения неразрывности,

$$C_1 \sin\alpha_1 = W_2 \sin\beta_2, \tag{4}$$

подставив в него известные [1] выражения для C_1 и W_2 получим

$$\frac{1-\rho}{1+\left(\dfrac{U}{C_0}\right)^2 - 2\dfrac{U}{C_0}\sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1} = \frac{\sin^2\beta_2}{\sin^2\alpha_1}. \tag{5}$$

Отсюда видно, что любой параметр из уравнения (5) может быть определен, если известны оставшиеся три. В связи с тем, что через α_1, β_2, U/C_0 и ρ можно выразить любой параметр ступени, то вместо них могут выступать и другие параметры, при помощи которых можно определить все относительные параметры ступени, построить относительные треугольники скоростей и рассчитать КПД Это также позволяет представлять η_u и другие параметры в виде функций от трех независимых переменных виде, $\eta_u = f(\alpha_1, \beta_2, U/C_0)$, $\eta_u = f(\rho, \alpha_1, U/C_0)$, $\eta_u = f(\varphi, \alpha_1, \alpha_2)$ и т.д. или в общем виде $\eta_u = f(x_1, x_2, x_3)$. Если рассматриваются функции двух $\eta_u = f(x_1 = \text{const}, x_2, x_3)$ или одной $\eta_u = f(x_1 = \text{const}, x_2 = \text{const}, x_3)$ переменных, то на остальные накладывают соответствующие ограничения. Очевидно, что от принятых параметров в качестве независимых переменных и количества зафиксированных параметров будет изменяться функция η_u, а значит и величина и расположение максимума этой функции. Покажем это, решив несколько конкретных задач.

Найдем соответствующую каждой задаче функцию $\eta_u = f(x_1, x_2, x_3)$ путем преобразования общеизвестного выражения

$$\eta_u = \frac{2U}{C_0^2}\left(C_{1u} + C_{2u}\right). \tag{6}$$

Заменим в (6) $C_0^2 = C_2^2 + 2U\left(C_{1u} + C_{2u}\right)$, $C_{1u}/C_z = \operatorname{ctg}\alpha_1$, $C_{2u}/C_z = -\operatorname{ctg}\alpha_2$ получим

$$\eta_u = \left(1 + \frac{\varphi\left(\operatorname{ctg}^2\alpha_2 + 1\right)}{2\left(\operatorname{ctg}\alpha_1 - \operatorname{ctg}\alpha_2\right)}\right)^{-1} \tag{7}$$

или в общем виде $\eta_u = f(\varphi, \alpha_1, \alpha_2)$.

Путем подстановки $C_{1u}/C_0 = \sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1$ и $\dfrac{C_{2u}}{C_0} = -\dfrac{U}{C_0} + \sqrt{\left(\sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1 - \dfrac{U}{C_0}\right)^2 + \rho}$

в (6) получим еще одно выражение для КПД в виде $\eta_u = f(\rho, \alpha_1, U/C_0)$,

$$\eta_u = \frac{2U}{C_0}\left(\sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1 - \frac{U}{C_0} + \sqrt{\left(\sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1 - \frac{U}{C_0}\right)^2 + \rho}\right). \tag{8}$$

Из (7) видно, что при $\varphi \to 0$ или $\alpha_1 \to 0$ $\eta_u \to 1$. Это позволяет утверждать, что в зависимости от φ или α_1 максимумов КПД не существует. Поэтому из основных параметров ступени η_u, α_1, β_2, α_2, U/C_0, φ, ρ экстремум функции $\eta_u = f(x_1 = \text{const}, x_2 = \text{const}, x_3)$ может существовать только в зависимости от U/C_0 или α_2, или ρ. Необходимо иметь ввиду, что функции типа $\eta_u = f(x_1 = \text{const}, x_2 = \text{const}, x_3)$ не представляют собой зависимости η_u от x_3 конкретных ступеней, а представляют набор значений η_u разных ступеней с одинаковыми x_1 и x_2. Например, значение

$\eta_u = f(\rho = 0,\ \alpha_1 = 20°,\ U/C_0 = 0{,}3) = 0{,}7676$ соответствует ступени с $\alpha_1 = 20°$ и $\beta_2 = 28{,}3°$, а значение $\eta_u = f(\rho = 0,\ \alpha_1 = 20°,\ U/C_0 = 0{,}5) = 0{,}8794$, ступени $\alpha_1 = 20°$ и $\beta_2 = 37{,}9°$. Максимум функции $\eta_{u\max} = f(\rho = 0,\ \alpha_1 = 20°,\ (U/C_0)_{\text{opt}})$ означает, что во множестве ступеней с $\rho = 0$ и $\alpha_1 = 20°$ есть ступень с наибольшим $\eta_{u\max}$ при $(U/C_0)_{\text{opt}}$. В этом примере ($\rho = 0$, $\alpha_1 = 20°$) $\eta_{u\max} = 0{,}883$; $(U/C_0)_{\text{opt}} = 0{,}4698$; $\beta_2 = 36°$.

Задача 1. *Из множества ступени с осевым выходом потока найти параметры ступеней с наибольшим КПД*

Запишем уравнения (6) и (7) с учетом того, что при осевом выходе потока $C_{2u} = 0$, $\alpha_2 = 90°$, $\text{tg}\,\beta_2 = \varphi_{\text{ос}}$, где $\varphi_{\text{ос}} = C_z/U = C_2/U$,

$$\eta_u = \frac{2UC_{1u}}{C_0^2} = 2\varphi_{\text{ос}}\,\text{ctg}\,\alpha_1\left(\frac{U}{C_0}\right)^2 = 2\frac{U}{C_0}\sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1\,; \tag{9}$$

$$\eta_u = \frac{2\,\text{ctg}\,\alpha_1}{\varphi_{\text{ос}} + 2\,\text{ctg}\,\alpha_1}\,. \tag{10}$$

Приравнивая правые части уравнений (9) и (10) после несложных преобразований получим выражение для U/C_0 если заданы α_1 и φ

$$\frac{U}{C_0} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_{\text{ос}}\left(\varphi_{\text{ос}} + 2\,\text{ctg}\,\alpha_1\right)}} \tag{11}$$

или известную формулу [1] если заданы α_1 и ρ

$$\frac{U}{C_0} = \frac{\cos^2\alpha_1 + \rho\sin^2\alpha_1}{2\sqrt{1-\rho}\cos\alpha_1}\,. \tag{12}$$

Подставив (12) в (9) получим выражение для η_u в виде

$$\eta_u = \cos^2\alpha_1 + \rho\sin^2\alpha_1\,, \tag{13}$$

из которого следует $\rho \to 1$, $\eta_u \to 1$. При $\rho = 0$ из (12) и (13) получаем известные [1, 2] формулы $U/C_0 = \cos\alpha_1/2$, $\eta_u = \cos^2\alpha_1$.

Из совместного решения (9) и (12), получаем

$$\rho = \frac{\text{tg}\,\alpha_1}{\left(\varphi_{\text{ос}} + \text{tg}\,\alpha_1\right)\sin^2\alpha_1} - \text{ctg}^2\,\alpha_1\,. \tag{14}$$

Таким образом, из множества ступени с осевым выходом потока наибольший КПД ступени $\eta_u = 1$ достигается или при $\varphi_{\text{ос}} \to 0$, или $\alpha_1 \to 0$, или $\rho \to 1$ (рис. 2*в*).

Приведенные здесь уравнения для ступеней с осевым выходом потока описывают расчетные режимы работы ступеней с конкретными α_1 и β_2, и не отражают изменение параметров в переменных режимах работы ступени.

Задача 2. *Из множества ступеней, зависимость КПД, которых представлена в виде* $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1,\ U/C_0)$, *найти параметры ступеней с наибольшим КПД при различных ограничениях.*

Как и в [1–3] рассмотрим $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1,\ U/C_0)$ как функцию одной переменной с ограничениями, т.е. $\eta_u = f(\rho = \text{const},\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0)$, $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0 = \text{const})$, и $\eta_u = f(\rho = \text{const},\ \alpha_1,\ U/C_0 = \text{const})$.

Влияние принятых ограничений на $\eta_{u\max}$ и α_2 в точке $\eta_{u\max}$ оценим, решая задачи с числовыми значениями параметров.

2.1 Задача $\eta_u = f(\rho = \text{const},\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0)$. Примем $\rho = 0$, $\alpha_1 = 20°$и $\alpha_2 = 90°$. По формулам (12) и (13) получаем $(U/C_0)_{\text{opt}} = 0{,}4698$, $\eta_{u\max} = 0{,}883$ (рис. 2*а*).

2.2 Задача $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0 = \text{const})$. Примем $\alpha_1 = 20°$ таким же, как в п. 2.1, $U/C_0 = 0{,}4698$. По уравнению (8), задавая ρ получим значения η_u и найдем $\eta_{u\max} = 0{,}894$, $\rho_{opt} = 0{,}2$, $\alpha_2^* = 70°$ (рис. 2*в*). В этой ступени КПД выше по сравнению со ступенью с $\alpha_2 = 90°$. Это означает, что такой же теплоперепад как теплоперепад ступени с осевым выходом потока при том же $\alpha_1 = 20°$ может быть сработан с большим КПД в ступени с не осевым выходом потока и с повышенной степенью реактивности.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчета двух турбин со ступенями с осевым и не осевым выходом потока. Расчеты выполнены при одинаковых для обеих турбин исходных данных: $P_0 = 3{,}468$ МПа; $T_0 = 540°$; $H_0 = 143{,}05$ кДж/кг; $G = 230$ кг/с; $U = 195$ м/с; $\alpha_1 = 20°$; $D_{ср} = 1{,}24$ м, количество ступеней $z = 2$.

Турбина со ступенями с осевым выходом потока. Теплоперепад на первую ступень примем равным $h_{01} = H_0/2 = 71525$ Дж/кг. При этом h_{01} $U/C_0 = 0{,}5156$. Используя значения U/C_0 и $\alpha_1 = 20°$ с помощью формулы (12) определяем степень реактивности при осевом выходе потока $\rho = 0{,}1387$. Теплоперепад на вторую ступень $h_{02} = H_0/2 + C_{21}^2/2 = 78731$ Дж/кг; $U/C_0 = 0{,}4914$; $\rho = 0{,}069$. КПД определяем по формуле (13).

Таблица 1

Параметры турбины со ступенями с осевым выходом потока

Номер ступени	h_0, Дж/кг	ρ	C_1, м/с	C_2, м/с	$l_л$, мм	η_u	N, МВт	α_2	β_2
1	71525	0,139	351	120	61	0,89925	14,793	90	31
2	78731	0,069	383	131	56	0,89109	16,136	90	34

Мощность турбины $N = N_1 + N_2 = 30{,}929$ МВт.

Турбина со ступенями с не осевым выходом потока. При тех же исходных данных теплоперепад на первую оставляем неизменным и равным 71525 Дж/кг. Теплоперепад на вторую ступень определяем с учетом выходной скорости из первой ступени. Для каждой ступени путем изменения ρ осуществляем поиск максимума функции $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0 = \text{const})$ (см. рис. 2*б*) и определяем значение р в точке с максимальным КПД.

Таблица 2

Параметры ступеней с не осевым выходом потока

Номер ступени	h_0, Дж/кг	ρ	C_1, м/с	C_2, м/с	$l_л$, мм	η_u	N, МВт	α_2	β_2
1	71525	0,314	313	107	69	0,90908	14,955	70,0	25,0
2	78028	0,262	339	116	63	0,90229	16,193	70,0	26,0

Мощность турбины $N = N_1 + N_2 = 31{,}148$ МВт.

Из рассматриваемых здесь двух постановок задач с разными ограничениями, наибольший КПД и мощность турбины достигается в случае отклонение потока от осевого направления на угол α_1 против вращения.

2.3 Задача $\eta_u = f(\rho = \text{const},\ \alpha_1,\ U/C_0 = \text{const})$. Примем $(U/C_0) = 0{,}4698$ и $\rho = 0$. По уравнению (8), задавая α_1 вычислим η_u, значения которых представлены на рис. 2*в*. откуда видно, что максимум $\eta_u = 1$ достигается при $\alpha_1 \to 0$. В точке $\alpha_1 = 20°$, $\eta_u = 0{,}883$, $\alpha_2 = 90°$ (рис. 2*в*).

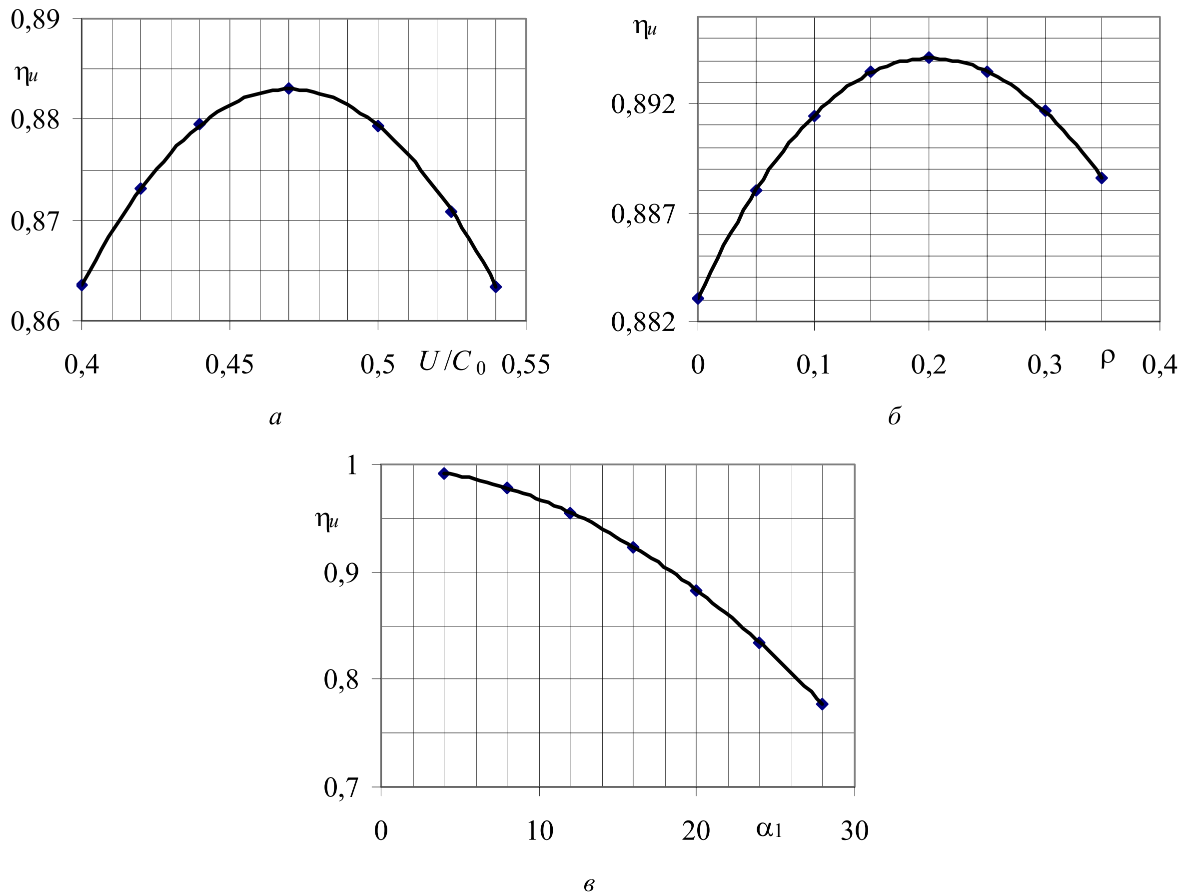

Рис. 2 – Графики КПД: *а* – $\eta_u = f(\rho = 0,\ \alpha_1 = 20°,\ U/C_0)$;
б – $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1 = 20°,\ U/C_0 = 0{,}4698)$; *в* – $\eta_u = f(\rho = 0,\ \alpha_1,\ U/C_0 = 0{,}4698)$

Если для проектирования ступени в качестве основных параметров приняты ρ, α_1, U/C_0 и производится оценка КПД в функции одного параметра при фиксированных двух остальных то однозначное решение имеют функции п. 2.1 $\eta_u = f(\rho = \text{const},\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0)$ и п. 2.2 $\eta_u = f(\rho,\ \alpha_1 = \text{const},\ U/C_0 = \text{const})$. Функция п. 2.3 $\eta_u = f(\rho = \text{const},\ \alpha_1,\ U/C_0 = \text{const})$ однозначного решения не имеет. Наибольший КПД при заданных U/C_0 и α_1 достигается при отклонение потока от осевого направления на угол α_1 против вращения.

Задача 3. *Из множества ступеней, зависимость КПД, которых представлена в виде* $\eta_u = \mathrm{f}(\varphi,\ \alpha_1,\ \alpha_2)$*, найти параметры ступеней с наибольшим КПД при ограничениях*: $\eta_u = f(\varphi = \text{const},\ \alpha_1 = \text{const},\ \alpha_2)$, $\eta_u = f(\varphi = \text{const},\ \alpha_1,\ \alpha_2 = \text{const})$ и $\eta_u = f(\varphi,\ \alpha_1 = \text{const},\ \alpha_2 = \text{const})$.

Проведем такой же, как и в [5] анализ функции $\eta_u = f(\varphi = \text{const},\ \alpha_1 = \text{const},\ \alpha_2)$, которая представлена уравнением (7).

Дифференцируя уравнение (7) по $\operatorname{ctg}\alpha_2$ и приравнивая результат к нулю, получим

$$\operatorname{ctg}^2\alpha_2 - 2\operatorname{ctg}\alpha_1 \operatorname{ctg}\alpha_2 - 1 = 0\,.$$

Из решения это уравнения следует $\operatorname{ctg}\alpha_2 = \operatorname{ctg}\left(\pi + \alpha_1/2\right)$ откуда

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha_1}{2}\,.$$

Найдем выражение для $\eta_{u\max}$ подставив ctg α_2 в уравнение (7)

$$\eta_{u\max} = \left(1 + \varphi\left(\frac{1}{\sin\alpha_1} - \operatorname{ctg}\alpha_1\right)\right)^{-1}. \tag{15}$$

С учетом того, что при $\eta_u = \eta_{u\max}$, $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha_1}{2}$ из совместного решения (6) и (7) найдем

$$\left(\frac{U}{C_0}\right)_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{1}{\varphi\left(\frac{2}{\sin\alpha_1} + \varphi\left(1 + \operatorname{tg}^2\alpha_1\right)\right)}}. \tag{16}$$

Выражение ρ_{opt} получим из уравнения

$$\varphi = \frac{C_z}{U} = \sqrt{1-\rho}\left(\frac{U}{C_0}\right)^{-1}\sin\alpha_1$$

в точке $\eta_u = \eta_{u\max}$

$$\rho_{\text{opt}} = 1 - \left(\varphi\left(\frac{U}{C_0}\right)_{\eta_{u\max}}\frac{1}{\sin\alpha_1}\right)^2. \tag{17}$$

Из рассматриваемой совокупности ступеней с $\alpha_1 = \text{const}$ и $\varphi = \text{const}$ в зависимости от α_2, наибольший КПД достигается у ступени с закруткой потока на выходе против вращения на угол $\alpha_1/2$ от осевого направления.

Влияние принятых ограничений на $\eta_{u\max}$ и α_2 в точке $\eta_{u\max}$ оценим, решая задачи с числовыми значениями параметров.

3.1 Задача $\eta_u = f(\varphi = \text{const}, \alpha_1 = \text{const}, \alpha_2)$. Примем $\varphi = 0{,}5$ и $\alpha_1 = 20°$ и формулам (15)–(17) находим $\eta_{u\max} = 0{,}919$, $(U/C_0)_{\text{opt}} = 0{,}56$, $\rho_{\text{opt}} = 0{,}33$, $\alpha_{2\text{opt}} = 100°$ ($\alpha_{2\text{opt}}^* = 80°$). Наибольший КПД достигается при отклонении потока от осевого направления на угол 10° против вращения.

При этих же $\varphi = 0{,}5$ и $\alpha_1 = 20°$ для случая $\alpha_2 = 90°$ по формулам (10), (11), (14) находим $\eta_{u\max} = 0{,}917$, $(U/C_0)_{\text{opt}} = 0{,}58$, $\rho_{\text{opt}} = 0{,}29$

3.2 Задача $\eta_u = f(\varphi = \text{const}, \alpha_1, \alpha_2 = \text{const})$. Как следует из (7) однозначного решения не имеет. При любых конечных значениях φ и α_2 при $\alpha_1 \to 0$, $\eta_u \to 1$.

3.3 Задача $\eta_u = f(\varphi, \alpha_1 = \text{const}, \alpha_2 = \text{const})$. Как следует из (7) однозначного решения не имеет. При любых конечных значениях α_1 и α_2 при $\varphi \to 0$, $\eta_u \to 1$.

Довольно просто получить и значения углов α_2 при максимальном значении КПД во множествах ступеней, выражения для КПД которых имеют вид, например,
$\eta_u = f(\rho = \text{const}, \alpha_1 = \text{const}, C_{2u}/C_0)$, $\eta_{u\max}$ достигается при $\alpha_2 = 90°$;
$\eta_u = f(\varphi = \text{const}, U/C_0 = \text{const}, \alpha_2)$, $\eta_{u\max}$ достигается при $\alpha_2 = 90°$;
$\eta_u = f(\varphi = \text{const}, \rho = \text{const}, \alpha_2)$ [5], $\eta_{u\max}$ при $\alpha_2 = \pi/2 + \alpha_1$.

Выводы

1 Анализ решений рассмотренных постановок задач и приведенных в [1–5], показывает, что от принятых параметров ступени в качестве независимых переменных и назначенных ограничениях в уравнениях $\eta_u = f(x_1, x_2, x_3)$ наибольшее значение КПД ступени может быть достигнуто как при осевом выходе потока, так и при закрутке потока за ступенью.

2 Выводы авторов [1–5] в той части, которая относится к рассматриваемым ими задачам, вполне обоснованы, но являются некорректными при обобщении этих выводов на весь возможный комплекс задач.

3 Во всех постановках задач, где используются функции вида $\eta_u = f(x_1 = \text{const}, x_2 = \text{const}, x_3)$, кроме функций $\eta_u = f(\alpha_1 = \text{const}, \beta_2 = \text{const}, x_3)$, значения η_u, вычисляемые по этим функциям, относятся к разным ступеням и поэтому нельзя отождествлять эти функции с зависимостью η_u от x_3 ступени с фиксированной геометрией.

Список литературы: **1.** *Щегляев, А.В.* Паровые турбины [Текст] / А.В. Щегляев. – М.: Энергия, 1976. – 357 с. **2.** *Кириллов, И.И.* Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кириллов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 536 с. **3.** *Бойко, А.В.* Оптимальное проектирование проточной части осевых турбин [Текст] / А.В. Бойко. – Х.: Вища школа, 1982. – 151 с. **4.** *Хорлок, Дж.Х.* Осевые турбины [Текст] / Дж.Х. Хорлок. – М.: Машиностроение, 1972. – 212 с. **5.** *Диксон, С.Л.* Механика жидкостей и газов. Термодинамика турбомашин [Текст] / С.Л. Диксон. – М.: Машиностроение, 1981. – 213 с.

Поступила в редколлегию 10.02.13

УДК 621.165

К одномерной теории идеальной ступени осевой турбины [Текст] / **О.Н. Слабченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 13(987). – С. 149-156. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.

У статті показано, що найбільше значення ККД ідеальної ступені, залежно від прийнятих обмежень, може бути досягнуто як при осьовому виході потоку, так і при деякій закрутки вихідного потоку.

Ключові слова: турбіна, ступінь, параметри, ККД, осьовий вихід потоку.

The paper shows that the maximum efficiency ideal stage, depending on the constraints, can be achieved as the axial outlet flow and with some twist of the effluent.

Keywords: turbine, stage, options, efficiency, axial flux output.