

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОШЕННОЙ СО СТОРОНЫ КОРЫТЦА ВЫХОДНОЙ КРОМКИ ЛОПАТКИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ НА ПРОФИЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В НЕОХЛАЖДАЕМОМ ЛОПАТОЧНОМ ВЕНЦЕ

© 2006 О.В. Батурин, В.Н. Матвеев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Излагаются расчетные результаты исследования влияния скошенной со стороны корытца выходной части профиля неохлаждаемой лопатки осевой турбины на профильные потери в лопаточном венце. Приведено обоснование полученных результатов и предложены рекомендации по выбору формы выходной кромки лопаток.

Значительную часть профильных потерь в лопаточном венце осевой турбины составляют кромочные потери. Поэтому действенным способом улучшения газодинамической эффективности венца является снижение кромочных потерь за счет утонения выходной кромки лопатки. Одним из возможных способов уменьшения толщины выходной кромки, часто используемым в охлаждаемых турбинах, является применение скошенной выходной части профиля. Преимущество лопатки со скосом выходной кромки заключается в том, что она сочетает в себе кромочные потери близкие к потерям лопатки с тонкой выходной кромкой и прочностные свойства лопатки с толстой выходной кромкой. В практике проектирования неохлаждаемых ступеней турбин часто приходится сталкиваться с тем, что применение тонкой выходной кромки является нежелательным по прочностным соображениям. Поэтому представляется целесообразным распространить опыт, полученный при использовании специальных форм выходных кромок лопаток в охлаждаемых ступенях, на неохлаждаемые лопаточные венцы.

Процесс создания нового профиля со скосом на корытце можно разбить на два этапа. Сначала с помощью известных методов [1...3] профилирование получают исходный профиль (рис. 1,а). Затем к нему пристраивается скошенная выходная часть (рис. 1,б). У такого профиля можно выделить два характерных сечения: $a_{гор}$ – горло исходного профиля и $a_{гор}^*$ – кратчайшее расстояние от выходной кромки до спинки профиля (рис 2).

Возможны три варианта формы межлопаточного канала со скошенной у корытца выходной частью:

- межлопаточный канал сужается по всей длине ($a_{гор} > a_{гор}^*$);
- межлопаточный канал расширяется за сечением $a_{гор}$ ($a_{гор} < a_{гор}^*$);
- поверхность скоса эквидистантна спинке ($a_{гор} = a_{гор}^*$).

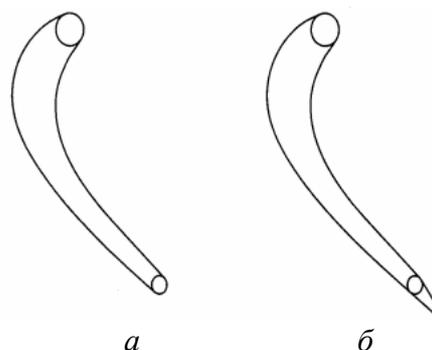


Рис. 1. Профили лопатки: исходный (а) и со скошенной выходной кромкой (б)

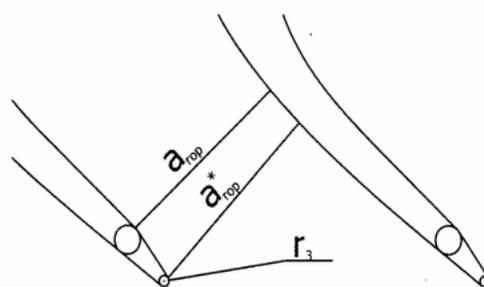


Рис. 2. Характерные сечения решетки со скошенной выходной кромкой

Расчетное исследование проводилось с помощью программы Fluent. В качестве объекта газодинамического исследования была выбрана решетка профилей рабочего колеса турбины, данные которой приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры исследуемой решетки профилей

α_0 , град	40,5	b, мм	29,1
α_1 , град	27,8	C_m , мм	6,1
λ_{IS} расч.	0,95	δ , град	14,5
t, мм	29,19	$\alpha_{0л}$, град	45
$\alpha_{1л}$, град	27,5	r_1 , мм	1,9
γ , град	55,5	r_2 , мм	1,05
ω_1 , град	34	\bar{X}_c	0,17
ω_2 , град	6	r_3 , мм	0,4

Для исследования влияния скошенной выходной кромки лопатки на эффективность профиля были созданы 4 расчетные модели: решетка с базовым профилем; решетка со скосом эквидистантным спинке ($a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$); решетка с сужающимся межлопаточным каналом ($a_{ГОР} > a_{ГОР}^*$) и решетка с каналом, расширяющимся за сечением $a_{ГОР}$ ($a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$).

Следует отметить, что поскольку все основные параметры (хорда, ширина, радиусы входной и выходной кромок) профилей моделей решеток при $a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$ и при $a_{ГОР} > a_{ГОР}^*$, кроме формы профиля корытца в выходной части идентичны, то эти профили, по-видимому, будут иметь близкие потери трения и кромочные потери.

Величина $a_{ГОР}$ составляет 11,03 мм. Для варианта подрезки $a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$ величина $a_{ГОР}^*$ составляет 11,5 мм, для остальных вариантов величины $a_{ГОР}^*$ и $a_{ГОР}$ равны.

В расчете были приняты следующие граничные условия:

- на границах, смежных с соседними межлопаточными каналами, было установлено периодическое граничное условие;
- перед решеткой профилей задавались полное давление и температура $T_0 = 288K$. Полное давление выбиралось из условия достижения заданного значения приведенной изэнтропической скорости λ_{IS} . Кроме того, на входе в решетку задавался уровень входной турбулентности, равный 5%;
- на выходе из межлопаточного канала задавалось статическое давление, равное 101325 Па.

В качестве рабочего тела использовался воздух, подчиняющийся закону идеального газа. Вязкость рабочего тела рассчитывалась по формуле Сатерленда. Модель потока была разбита на четырехугольные конечные элементы. Расчет велся до уровня остаточных невязок 10^{-4} . При расчете использовалась модель турбулентности RNG k- ϵ .

В ходе расчетов для каждой модели были получены величины профильных потерь $\zeta_{ПР}$ и значение угла выхода потока из решетки α_1 . Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов профиля с разными вариантами скоса выходной кромки со стороны корытца

Профиль	базовый	$a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$	$a_{ГОР} > a_{ГОР}^*$	$a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$
$\zeta_{ПР}, \%$	4,52	4,18	3,62	7,782
α_1 , град	25,58	25,18	25,41	26,16

Применение скоса со стороны корытца приводит к снижению профильных потерь только при условии, что межлопаточный канал сужается на всем протяжении или скос эквидистантен спинке. Вариант скоса, с расширяющейся выходной частью, наоборот, увеличивает потери.

У исследованных решеток со скосом величина диаметра выходной кромки r_3 (рис. 2) одинакова для всех вариантов, а величины горла различаются незначительно. Согласно существующим представлениям применение скошенной выходной части должно приводить к снижению кромочных потерь на одну величину для всех вариантов одного и того же профиля. Однако расчеты показали, что изменение профильных потерь у данных решеток различно. На основании этого был сделан вывод о том, что введение скошенной со стороны корытца выходной кромки привело к изменению величин других компонентов профильных потерь.

Изменение составляющих потерь было выявлено с помощью представленных на рис. 3 картин распределения условной приведенной скорости λ по периметру профиля.

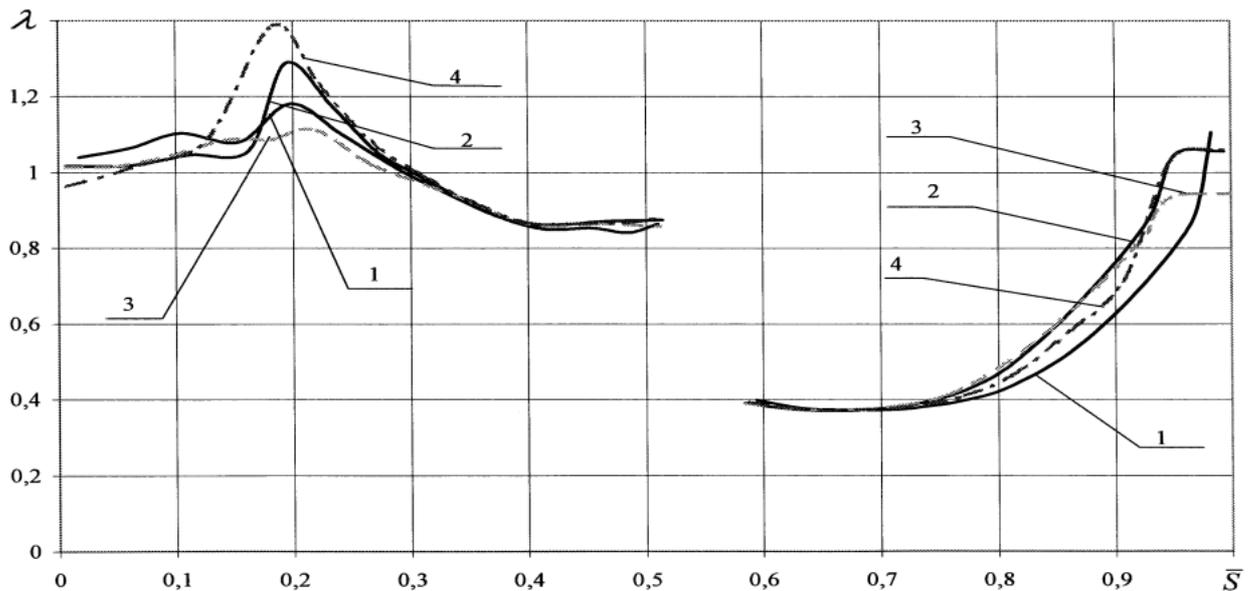


Рис. 3. Распределение условной приведенной скорости λ по контуру профиля лопатки РК ТВД в среднем сечении: 1 – базовый профиль (сплошная линия), 2 – профиль со скосом по схеме $a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$ (сплошная линия), 3 – профиль со скосом по схеме $a_{ГОР} > a_{ГОР}^*$ (пунктир); 4 – профиль со скосом по схеме $a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$ (штрих пунктир)

Приведенная скорость названа условной, так как на самом деле на поверхности лопатки скорость равна нулю. Величина λ определяется по газодинамической функции $\pi(\lambda) = p_i / p_0^*$, где p_i – статическое давление на профиле, p_0^* – давление заторможенного потока на входе в решетку.

В решетках из профилей с изломом на поверхности корытца ($a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$ – кривая 2 и $a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$ – кривая 4 на рис. 3) наблюдается повышение скорости в районе горла. Этот разгон вызван влиянием излома контура профиля. При повороте потока на нем, скорость газа увеличивается, а давление, температура и плотность снижаются [5]. Кроме того, при обтекании точки излома появляется небольшая сверхзвуковая область. За ней возникает скачек уплотнения на корытце вблизи выходной кромки, который может занимать почти весь межлопаточный канал, что вызывает рост волновых потерь. Следует отметить, что у решетки из профилей с расширяющимся к выходу межлопаточным каналом ($a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$) повышение скорости происходит интенсивнее, чем при использовании скоса эквидистант-

ного спинке ($a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$), поскольку у нее диффузорность участка за сечением $a_{ГОР}$ больше. Поэтому, у решетки с расширяющимся к выходу межлопаточным каналом ($a_{ГОР} < a_{ГОР}^*$), снижение кромочных потерь сводится на нет ростом волновых потерь.

В решетке без излома контура профиля ($a_{ГОР} > a_{ГОР}^*$) полученные зависимости $\lambda = f(\bar{s})$ подобны аналогичной зависимости решетки со скосом, эквидистантным спинке ($a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$), однако локальных ускорений потока в ней не наблюдается. Профили этих решеток отличаются только формой выходной части. Поэтому и кромочные потери, и потери, обусловленные трением в пограничном слое, у этих решеток близки и, следовательно, величины профильных потерь для этих моделей будут отличаться лишь на величину дополнительной составляющей, обусловленной наличием ускорения потока вблизи излома контура профиля у лопаток с $a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$. Рассчитанная величина дополнительной составляющей профильных потерь, обусловлен-

ная изломом контура лопатки с подрезкой $a_{ГОР} = a_{ГОР}^*$, равна 0,56%.

Таким образом, в случае, когда по условиям прочности профили с тонкими выходными кромками неприемлемы, следует использовать такую скошенную со стороны корытца выходную часть профиля, которая бы обеспечивала сужающийся межлопаточный канал или поверхность скоса эквидистантную поверхности спинки.

Список литературы

1. Мамаев Б.И., Рябов Е.К. Построение решеток турбинных профилей методом доминирующей кривизны //Теплоэнергетика. – 1979. – №2. – С. 52–55.
2. Мамаев Б.И., Рябов Е.К. Построение турбинных решеток профилей на ЭВМ //Вопросы проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей: Межвуз. сб. /Куйбышев: КуАИ, 1977. – С. 49–57.
3. Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлев В.А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М., «Энергоатомиздат». 1984. – 150с.
5. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961.– 671с.

CALCULATED STUDY OF INFLUENCE OF SQUINTED FORM PRESSURE SIDE OF OUTLET TRAILING EDGE OF AXIAL TURBINE VANE UPON PROJECTION LOSSES IN NON-COOLED VANE ROW

© 2006 O.V. Baturin, V.N. Matveev

Samara State Aerospace University

The article sets forth the calculated research of influence of squinted form pressure side of outlet trailing edge of non-cooled vane section of axial turbine upon projection losses in vane row. The justification of the results received has been stated and recommendations on the choice of vanes trailing edge have been suggested.