

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБИНЫХ РЕШЁТОК ПРИ УГЛАХ АТАКИ

Ермолаев Г.В.

ОКБ им А. Льюльки, ул. Касаткина, д. 13, Москва, 12930, ermolaev_grigory@mail.ru

Ключевые слова: Решетка, профиль, корыто, спинка, конфузурность, относительный шаг, обтекание, потери.

В турбинных решетках отрицательному углу атаки $\Delta\beta_1 = \beta_{1к} - \beta_1$, где $\beta_{1к}$ – конструктивный угол входа; где β_1 – угол входа потока, присущи разные по характеру зависимости коэффициента профильных потерь от угла атаки $\Delta\zeta$ [1-3]. Объясняется этот факт тем, что условие $\Delta\beta < 0^\circ$ означает работу решётки с меньшим поворотом потока, а при $\beta_1 < 90^\circ$ ещё и с ростом конфузурности потока $k = \sin \beta_1 / \sin \beta_2$. Поэтому при умеренных величинах угла атаки (до 5-10°), естественно, ожидать уменьшения потерь. В виду чего использовалась рекомендация выполнять решетку с отрицательным углом атаки [2,4].

Детальный анализ различий прямой и обратной задачи об угле атаки показал ошибочность такой рекомендации в общем случае [4]. Однако в этом анализе потери $\Delta\zeta$ определялись по формуле из работы [1], в которой учитывается влияние только углов $\beta_{1к}$, β_1 и β_2 , а как установлено, например, [2, 3], потери от угла атаки являются сложной функцией многих геометрических и режимных параметров решётки, среди которых: относительная толщина \bar{c} , относительный шаг \bar{t} , относительная толщина входной кромки \bar{d}_1 и скорость на выходе из решётки λ_2 . Поэтому дополнительные исследования влияния отрицательного угла атаки на профильные потери полезны не только для более точного расчета характеристик турбин, но и для оптимального профилирования новых лопаток.

Работа основывается на анализе результатов аэродинамических испытаний прямых до- и трансзвуковых решеток. В настоящее время именно такой способ может быть эффективным при изучении нестационарных отрывных течений, когда нет теоретического решения задачи, а численные решения дают сильно отличающиеся от эксперимента результаты [5,6].

Для анализа были отобраны результаты продувок 58 решеток, геометрические параметры которых изменялись в широких диапазонах: $\beta_{1к} = 29 - 104^\circ$, $\beta_{2эф} = 19 - 42^\circ$, $\bar{c} = 0.85 - 0.33$, $\bar{t} = 0.55 - 1.05$, $\bar{d}_1 = 0.086 - 0.28$. Испытания проводились при $\lambda_2 = 0.5 - 1.0$, $\Delta\beta_1 = -40 - 0^\circ$, числах Рейнольдса более $5 \cdot 10^5$ и степени начальной турбулентности 2 – 5% [7].

В соответствии с представлениями о влиянии геометрической конфузурности $k_p = \sin \beta_{1к} / \sin \beta_{2эф}$ и \bar{c} на атакоустойчивость, решётки разделены на три группы: 1) сопловые решётки первых ступеней с высокой конфузурностью $k_p = 2.6 - 3.4$ и величинами $\bar{c} = 0.15 - 0.19$, $\beta_{1к} = 93 - 104^\circ$, $\bar{d}_1 = 0.11 - 0.17$; 2) решётки с малой толщиной $\bar{c} = 0.085 - 0.11$, $k_p = 1.3 - 2.5$, $\beta_{1к} = 50 - 90^\circ$, $\bar{d}_1 = 0.045 - 0.087$; 3) решётки средних и корневых сечений сопловых и рабочих венцов с $k_p = 1.0 - 1.9$, $\bar{c} = 0.17 - 0.33$, $\beta_{1к} = 29 - 66^\circ$, $\bar{d}_1 = 0.07 - 0.11$.

Сопловые решётки высокой конфузурности с углом $\beta_{1к} \approx 90^\circ$, как правило, при $\Delta\beta_1 = 0^\circ$ имеют благоприятное обтекание передней части профиля без пиков скорости и диффузорных зон на спинке и корыте. Умеренный по величине отрицательный угол атаки не может сильно изменить обтекание решётки, поэтому существует широкий диапазон углов атаки (до 40°), в котором профильные потери не изменяются, т.е. $\Delta\zeta \approx 0$.

Решётки из тонких профилей с острой входной кромкой ($\bar{d}_1 < 0.1$) особенно чувствительны к углу атаки [2, 3]. Решётки сравнительно высокой конфузурности ($k_p > 1.7$) и достаточно густые ($\bar{t} < 0.9$) при $\Delta\beta_1 = 0^\circ$ имеют вблизи входной кромки профиля благоприятное течение с низкими скоростями, поэтому умеренный угол атаки $\Delta\beta_1 < 0^\circ$ слабо сказывается на обтекании и потерях в решётке. С понижением конфузурности k_p обтекание профилей ухудшается, на корыте вблизи входной кромки может появиться диффузорный участок, и решётка становится более чувствительной к изменению угла входа. В целом, для решёток из тонких профилей с конфузурностью $k_p \geq 1.3$ и достаточной густотой характер влияния при $\Delta\beta_1 < 0^\circ$ на обтекание и потери совпадает с характером в высоко конфузурной решётке, лишь с

уменьшением k_p потери становятся более значительными. Особенностью данных решёток является то, что они могут выполняться с шагом больше оптимального на 15-20%, что ведёт к заметному росту потерь и снижению махостойкости и атакоустойчивости.

Решетки с величинами $k_p < 2$ и $\bar{c} > 0.17$ встречаются в различных по высоте сечениях сопловых и рабочих венцов многих турбин. Для них оказалось, что благоприятное обтекание спинки имеют решетки с $k_p > 1.4$, а проблемное обтекание чаще всего встречается в решетках с $k_p = 1-1.4$. В решетках первого типа при углах атаки величиной менее 20° можно принять $\Delta\zeta \approx 0$, как и в высококонфузорных решётках. В решётках второго типа при углах атаки величиной до 15° , когда обтекание спинки заметно улучшается, значение $\Delta\zeta < 0$.

Подводя итоги, можно отметить, что характер влияния угла $\Delta\beta_1 < 0^\circ$ на обтекание и потери для всех турбинных решёток по сути одинаковый. Разница заключается в интенсивности влияний, которая увеличивается со снижением конфузорности и густоты решетки. Влияние отрицательного угла атаки на профильные потери турбинной решётки может быть определено по обтеканию передней части профиля при расчётном натекании. Если при $\Delta\beta_1 = 0$ она обтекается без значительных диффузорных зон, то при величинах не более $5-10^\circ$ коэффициент потерь от угла атаки $\Delta\zeta \approx 0$. Если обтекание входного участка спинки неблагоприятное, то при умеренных углах атаки $\Delta\zeta < 0$, а если неблагоприятное обтекание входного участка профиля со стороны корыта, то $\Delta\zeta > 0$. В большинстве решёток при превышении отрицательного угла атаки величин $10-15^\circ$ потери растут, причем этот рост больше в решётках меньшей конфузорности и густоты.

Рекомендуется при проектировании решётки выбирать $\Delta\beta_1$ таким, чтобы не было значительных диффузорных участков течения вблизи входной кромки профиля.

Список литературы

1. Степенев Г.Ю. Гидродинамика Решёток турбомашин. М.: ГИФМЛ, 1962.
2. Абианц В.Х. Теория авиационных газовых турбин. М.: Машиностроение. 1979.
3. Дейч М.Е. Газодинамика решёток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996. 538 с.
4. Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлёв В.А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. М.: Машиностроение, 1975, 192 с.
5. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т. 1. М.: Мир, 1990.
6. Зарянкин А.Е. Основы физического моделирования, элементы теории размерностей и примеры её практического использования в задаче гидрогазодинамики. М.: МЭИ. 2017.
7. Венедиктов В.Д., Грановский А.В., Карелин А.М. и др. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин. М.: ЦИАМ. 1990. 395 с.

Сведения об авторе

Ермолаев Григорий Вениаминович, главный специалист, газовая динамика турбин и выхлопных патрубков.

PARAMETERS OF TURBINE CASCADES AT INCIDENCE

Ermolaev G.V.

Lyulka Design Bureau, Kasatkina str., 13, Moscow, 12930, Russia, ermolaev_grigory@mail.ru

Keywords: turbine cascade, convergence, pitch/chord ratio, streamlines, losses, airfoil, pressure side, suction side.

Analysis of results of experimental data of turbine cascades showed that the nature of the influence of negative incidences on profile losses can be determined by streamline of the inlet part of the profile at design mode. If streamline is without diffuser zones, then at incidence values up to 10 degrees incidence losses will be zero. If at moderate incidences streamline on suction side is unfavorable, then the incidence losses will be negative. And if streamline on suction side is favorable, then incidence losses will be positive. Geometric parameters of cascades with favorable and unfavorable streamline are defined, and recommendations for choosing optimal inlet metal angle in the designed cascades are refined.