

ПОТЕРИ ОТ УГЛА АТАКИ В ТУРБИННОЙ РЕШЕТКЕ

Мамаев Б.И., Полубояринова С.А., Стародумов А.В.
ОКБ им. А. Льюльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО», Москва
andrey.starodumov@okb.umpro.ru, poluboyarinova_sa@okb.umpro.ru

Результаты газодинамических расчетов турбины на различных режимах работы с углами атаки на входе в решетки $\Delta\beta_1 = \beta_{1к} - \beta_1$, где $\beta_{1к}$ – конструктивный угол входа, β_1 – угол входа потока, необходимы не только для анализа самой турбины, но и лучшего согласования узлов ГТУ в работе. Надежность этих результатов во многом определяется точностью определения потерь в решетках при разных значениях угла атаки $\Delta\beta_1$.

На практике для оценки потерь от угла атаки $\Delta\zeta = \zeta - \zeta_0$, где ζ – коэффициент потерь при $\Delta\beta_1 \neq 0$, ζ_0 – коэффициент потерь при расчетном натекании, когда $\beta_1 = \beta_{1к}$, используются различные полуэмпирические и эмпирические формулы, обобщающие экспериментальные данные по потерям в профильных решетках (например [1-3]). Если из таких формул выделить определяющие по влиянию геометрические и режимные параметры решетки, то можно записать: $\Delta\zeta \approx f(\bar{t}, \bar{d}_1, \bar{c}, \lambda_2, \Delta\beta_1, \beta_{1к}, \beta_{2эф})$, где t – шаг решетки, $\bar{t} = t/b$, b – хорда; d_1 – толщина входной кромки профиля, $\bar{d}_1 = d_1/b$; c – толщина профиля, $\bar{c} = c/b$; λ_2 – приведенная изэнтропическая скорость выхода потока, $\beta_{2эф}$ – эффективный угол выхода, $\beta_{2эф} = \arcsin a_2/t$, a_2 – горло канала решетки.

Получить надежное выражение для потерь от угла атаки, обобщающее зависимости значений $\Delta\zeta$ многих решеток и учитывающее все определяющие параметры, нереально. Именно поэтому авторы, аппроксимируя результаты экспериментов, вводят разного рода упрощения. При этом чаще всего ограничиваются учетом влияния только углов $\Delta\beta_1$, $\beta_{1к}$ и $\beta_{2эф}$. В работе [3] добавляются к ним величины \bar{d}_1 и \bar{t} , и только в формулу из [2] входит еще скорость λ_2 . Полученные формулы дают результаты, различающиеся между собой и сильно отличающиеся от экспериментальных.

Понятно, что уточнение величины $\Delta\zeta$ по-прежнему является актуальной задачей улучшения методики газодинамического расчета турбины.

Для решения этой задачи, прежде всего, было решено сформировать банк экспериментальных данных по величинам $\Delta\zeta$, используя достаточно обширный материал, имеющийся в атласах МЭИ и ЦИАМ [4, 5], а также в результатах продувок, проведенных в ЦАГИ, МВТУ и ряде авиационных ОКБ. Рассматривались в основном аэродинамически совершенные решетки. Всего в банке собрано 139 решеток, каждая из которых была продута при нескольких значениях $\Delta\beta_1$ и λ_2 . В итоге нашлось 2186 экспериментальных значений $\Delta\zeta$. Диапазоны изменения параметров решеток: $\beta_{1к} = 18.9-160^\circ$, $\beta_{2эф} = 12.5-44.1^\circ$, $\bar{t} = 0.39-1.05$, $\bar{c} = 0.038-0.46$, $\bar{d}_1 = 0.01-0.19$, $\Delta\beta_1 = (-59) - 54^\circ$, $\lambda_2 = 0.2-1.5$.

Анализ данных банка показал, что скорость выхода λ_2 влияет на потери $\Delta\zeta$ во всех исследованных решетках (например, рис. 1). Влияние этой скорости на значение ζ_0 принято учитывать, но обычно не принимается во внимание при оценке $\Delta\zeta$ [1, 3, 4]. Влияние скорости выхода на потери от угла атаки объясняется тем, что в решетке с ростом λ_2 снижаются относительные скорости обтекания λ/λ_2 во входной части канала и ее влияние на профильные потери уменьшается. По этой причине и ослабляется влияние угла атаки, проявляющееся в изменении течения в этой входной части решетки.

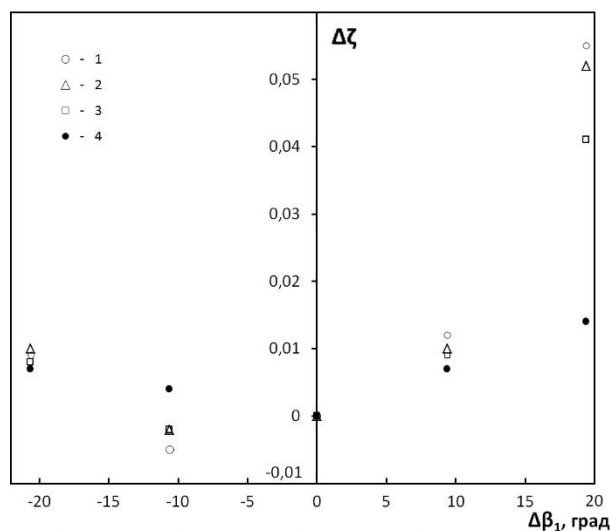


Рис. 1 – Результаты эксперимента для решетки № 67 ($\beta_{1к} = 66^\circ$, $\beta_{2эф} = 42.7^\circ$, $\bar{c} = 0.11$, $\bar{d}_1 = 0.06$, $\bar{t} = 0.71$) [5]: 1 – $\lambda_2 = 0.6$, 2 – 0.7 , 3 – 0.8 , 4 – 0.9

Оценивая малочисленные попытки получить аналитическую зависимость для оценки $\Delta\zeta$, учитывающую влияние большинства определяющих параметров (например [2, 3]), решено применить метод обобщения, включающий помимо математического аппарата средства современных ЭВМ. Как показала практика [6], именно такой путь целесообразно использовать при обобщении результатов, полученных в экспериментах разными авторами при многочисленных определяющих факторах и в широких диапазонах их изменения. Принципиально важное обстоятельство: следовало найти не одно обобщающее уравнение для оценки потерь, а создать программу расчета потерь в заданной решетке, опирающуюся на банк собранных данных и находящую уравнения для расчета значений $\Delta\zeta$ по потерям в определенной группе решеток.

Очевидно, применение такого подхода облегчается, если возможно выполнить априорную оценку характера аппроксимирующего уравнения для $\Delta\zeta$ как функции ряда параметров решетки. Влияние остальных определяющих параметров должно быть учтено при выборе нескольких решеток, имеющих небольшие отличия этих параметров от параметров заданной решетки.

Таким образом, все решетки, имеющиеся в банке, предстояло разделить на несколько групп по характеру зависимости $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$ и установить отличительные особенности решеток по определяющим параметрам в каждой группе.

Анализ банка показал, что все решетки делятся на три группы по однородному типу зависимости $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$: 1) при положительных и отрицательных углах атаки $\Delta\zeta > 0$ и потери непрерывно увеличиваются с ростом угла атаки; 2) при $\Delta\beta_1 > 0$ величина $\Delta\zeta > 0$ и увеличивается с ростом $\Delta\beta_1$, а при $\Delta\beta_1 < 0$ с ростом угла атаки потери сначала уменьшаются, достигая минимума при $\Delta\zeta < 0$, и далее растут, попадая в область $\Delta\zeta > 0$ при больших углах атаки [1, 4, 5]; 3) при положительных и отрицательных значениях $\Delta\beta_1$ существуют некоторые диапазоны угла от нуля до значения $\Delta\beta_{10}$, в которых потери $\Delta\zeta = 0$, а за границами этих диапазонов с ростом угла атаки потери увеличиваются (рис. 2).

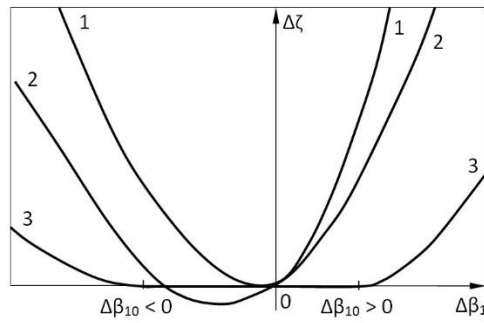


Рис. 2. Типы зависимостей $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$ в группах решеток 1, 2, 3

Из экспериментов следует, что с ростом λ_2 в решетках группы 2 уменьшается величина минимальных потерь и диапазон углов $\Delta\beta_1$, в котором $\Delta\zeta < 0$, а в решетках группы 3 сужаются диапазоны углов атаки, в которых $\Delta\zeta = 0$. Эти диапазоны сужаются и с ростом конфузурности решетки $k = \sin \beta_{1к} / \sin \beta_{2эф}$.

Ясно, что распространенные на практике формулы для оценки значения $\Delta\zeta$ ([1–3] и др.) не отражают многообразия реальных зависимостей потерь $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$. Поэтому их использование может приводить к ошибочным результатам.

Работа по разделению всех решеток в банке на три группы по характеру зависимости $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$ и определению особенностей геометрических параметров решеток, общих для каждой группы дала следующие результаты. Решетки группы 1 – решетки любой конфузурности из относительно тонких профилей с $\bar{c} \leq 0.11$, $\bar{d}_1 \leq 0.071$ и $\beta_{1к} \leq 110^\circ$. Чаще всего это периферийные сечения неохлаждаемых рабочих лопаток. Решетки группы 2 – самая многочисленная часть банка из различных сопловых и рабочих решеток с конфузурностью $k < 2.7$, $\bar{c} > 0.11$. Группа 3 – высококонфузорные решетки с $k \geq 2.7$ и $\bar{c} > 0.11$. Как правило, это сопловые решетки первых ступеней турбин с $\beta_{1к} \approx 90^\circ$.

При разработке программы расчета на ЭВМ рассмотрение всех графиков экспериментальных зависимостей $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$ сделало возможным назначить типы аппроксимирующих функций, единые для всех трех описанных групп решеток – полином 2-й степени в случае $\Delta\beta_1 \geq 0$ и 3-й степени для $\Delta\beta_1 \leq 0$.

Таким образом, в программе расчета характер зависимости $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$ в каждой заданной решетке определяют величины \bar{c} , \bar{d}_1 , $\beta_{1к}$ и $\beta_{2эф}$. Чтобы отразить дополнительное влияние относительного шага \bar{t} и скорости λ_2 и найти саму расчетную зависимость для потерь $\Delta\zeta$, выделяются узкие диапазоны отклонения каждого параметра от заданного значения, начиная с $\pm 2.5\%$. Находятся соответствующие этому условию решетки из банка и по методу наименьших квадратов вычисляются неизвестные коэффициенты полиномов.

Пример расчетов по программе показан на рис. 3. Из него видно, что отклонения результатов этих расчетов $\Delta\zeta$ от экспериментов гораздо меньше, чем расчетов по формулам из [1–3].

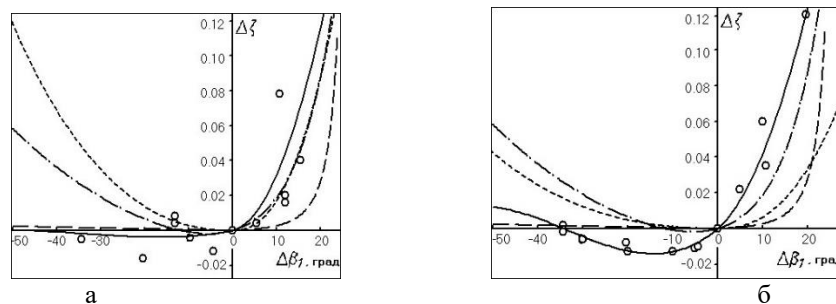


Рис. 3. Зависимость $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$ для решетки с $\beta_{1к} = 50^\circ$, $\beta_{2эф} = 30^\circ$, $\bar{c} = 0.17$, $\bar{d}_1 = 0.1$, $\bar{t} = 0.75$ при $\lambda_2 = 0.6$ (а) и 0.9 (б); 1 – эксперимент; расчет: 2 – по [1], 3 – [2], 4 – [3], 5 – по программе

Анализ показал, что включение программы в имеющиеся комплексы 1D и 2D газодинамических расчетов турбины не доставляет больших затруднений. Можно отметить еще одно достоинство выполненной работы: пополнение банка данных результатами новых экспериментов улучшает методику и повышает надежность расчета потерь. Наконец, разработанная программа может быть использована в целенаправленном поиске рекомендаций по выбору значения оптимального конструктивного угла входа в решетках для повышения КПД проектируемых турбин [6].

Список литературы

1. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: ГИФМЛ, 1962. 512 с.
2. Максимова М.К., Вавилов Г.А. Влияние угла входа потока на профильные потери турбинной решетки // Казань. ТрудыКАИ. 1973. С. 33–40.
3. Moustapha S.H., Kasker S.C., Tremlay B. An improved incidence losses prediction for turbine airfoils // Journal of turbomachinery. 1990. Ps. 267–276.
4. Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. М.: Машиностроение, 1965. 96 с.
5. Венедиктов В.Д., Грановский А.В., Карелин А.М., Колесов А.Н., Мухтаров М.Х. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин. М.: ЦИАМ, 1990. 393 с.
6. Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлев В.А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. М.: Машиностроение, 1975. 192 с.