

УДК 621.165

А.В. ЛАПУЗИН, канд. техн. наук, Ч.С. ЛИМ,
В.П. СУББОТОВИЧ, канд. техн. наук, Ю.А. ЮДИН, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОТЕРИ В РАБОЧИХ КОЛЕСАХ ОСЕВЫХ ТУРБИН

Розглянуті стан питання, яке присвячено впливу періодично нестационарних процесів на втрати в решітках турбін, і результати проведених авторами статті експериментальних досліджень чотирьох ступенів, відмінних геометричними кутами виходу і коефіцієнтами втрат соплових решіток. Запропонована нова аналітична залежність для оцінки додаткових втрат в робочому колесі.

The analysis of the publications related to influence of periodically nonstationary processes on the losses in the blade cascades is given. The analysis of results of carried out by authors of the article of experimental investigation of three turbine stages different by the geometrical outlet angles and nozzle loss coefficients is given too. New analytical dependence for determination of additional losses in rotor cascade is offered.

Проблема взаимного влияния сопловой решетки и рабочего колеса (РК) является одной из наиболее сложных в аэродинамике турбин и компрессоров. В идеализированных условиях статических испытаний прямых и кольцевых решеток на режимах безударного обтекания равномерным слаботурбулентным потоком потери в них невелики. В то же время в турбинах и компрессорах все решетки кроме первой обтекаются неравномерным высокотурбулентным потоком, что в большинстве случаев приводит к заметному увеличению потерь, которое необходимо учитывать в расчетных методиках определения характеристик турбины. Существующие методики расчета потерь от влияния периодической нестационарности, созданные 20-30 лет назад, требуют уточнений, учитывая широкий диапазон режимов работы современных турбинных ступеней.

В 2002-2004 годах в лаборатории турбиностроения НТУ «ХПИ» были определены характеристики рабочего колеса высоконагруженной газовой турбины. В соответствии с разработанной методикой РК испытывалось с тремя сопловыми решетками и одной решеткой стержней [1, 2]. Результаты этих исследований и обобщения, рассмотренные в данной статье, дополняют известные эксперименты и методики расчета потерь от периодической нестационарности.

Состояние исследуемого вопроса

Имеются экспериментальные данные разных авторов по влиянию вниз по потоку сопловой решетки на РК [3-11] и РК на сопловую решетку [12-14].

Обозначим профильные потери в среднем сечении РК в статических условиях при равномерном слаботурбулентном потоке перед ним – $\zeta_{лпр}$, а потери в этом же сечении при работе в составе ступени – $\zeta_{лср}$. Для оценки влияния периодической нестационарности на профильные потери в РК будем использовать разность $\Delta\zeta_{лср} = \zeta_{лср} - \zeta_{лпр}$ и отношение $\gamma_{лпр} = \zeta_{лср} / \zeta_{лпр}$ при одинаковых β_1 , M_{2t} , Re_{2t} .

В методике, разработанной на ЛМЗ [5], определение $\Delta\zeta_{л\text{ср}}$ в ступенях реактивного типа на режимах, близких к номинальному, производится с помощью критерия $Y = \zeta_{с\text{пр}}(1 - (U/C_1) \cdot \cos \alpha_1) / (1 + (U/C_1)^2 - 2(U/C_1) \cdot \cos \alpha_1 + \rho_0 / (1 - \rho_0))$.

Для расчета отношения $\gamma_{л\text{пр}} = 1 + 17,5 \Delta\beta$ авторы [4] используют амплитуду изменения угла β_1 в тангенциальном направлении $\Delta\beta = \beta_{1\text{кр}} - \beta_{1\text{г}}$, которая зависит от $\chi_{C_1} = (C_{1\text{г}} - C_{1\text{кр}}) / C_{1\text{г}} = 0,66 \sqrt{t_c \zeta_{с\text{пр}} / z \sin \alpha_1}$ – неравномерности поля скоростей в абсолютном движении и отношения U/C_1 .

В формуле $\gamma_{л\text{пр}} = 1 + 0,5(t_{\text{л}} / t_{\text{с}})(U/C_1)(\beta_1 + \beta_2) \chi_{W_1}$ [8] параметр $\chi_{W_1} = (W_{1\text{г}} - W_{1\text{кр}}) / W_{1\text{г}}$ характеризует неравномерность поля скоростей в относительном движении (параметры на оси кромочного следа отмечены индексом «кр»): $\chi_{W_1} = \chi_{C_1}(1 - U/C_1 \cos \alpha_1) / (U^2/C_1^2 - 2U/C_1 \cos \alpha_1 + 1)$.

На основе данных [3-11] по влиянию вниз по потоку сопловой решетки на РК и формул, обобщающих эксперименты, можно заключить:

1. Основными параметрами, влияющими на $\Delta\zeta_{л\text{ср}}$ и $\gamma_{л\text{пр}}$, являются $\zeta_{с\text{пр}}$, z , t_c , α_1 , которые определяют турбулентность потока и неравномерность абсолютной скорости χ_{C_1} , а также отношение скоростей U/C_1 , которое зависит от режима работы ступени, степени ее реактивности ρ_0 на номинальном режиме и определяет χ_{W_1} , $\Delta\beta$ – характеристики неравномерности потока в относительном движении.

2. Из трех рассмотренных выше методик наиболее универсальной является методика [4], т.к. позволяет рассчитать $\gamma_{л\text{пр}}$ в ступенях различных типов ($\rho_0 = 0 \dots 0,8$) при относительно небольших углах атаки. По мере увеличения ρ_0 до $0,4 \dots 0,5$ отношение $\gamma_{л\text{пр}}$ интенсивно растет, а затем незначительно снижается.

3. Методики [5] и [8] дают удовлетворительные оценки $\Delta\zeta_{л\text{ср}}$ и $\gamma_{л\text{пр}}$ для ступеней реактивного типа ($\rho_0 = 0,2 \dots 0,5$) на режимах, близких к расчетным. Однако для ступеней с $\rho_0 > 0,5$, $U/C_1 > 1$ расчеты по этим методикам приводят к результатам ($\Delta\zeta_{л\text{ср}} \leq 0$, $\gamma_{л\text{пр}} \leq 1$), которые противоречат экспериментальным данным [9, 10].

4. Высокие значения $\gamma_{л\text{пр}}$ в ступенях реактивного типа в значительной мере обусловлены низкими потерями $\zeta_{л\text{пр}}$ на режимах с малыми углами атаки $\beta_1 - \beta_{1\text{г}}$.

5. Данные о влиянии величины межвенцового зазора z на $\Delta\zeta_{л\text{ср}}$ и $\gamma_{л\text{пр}}$ противоречивы: или резкое снижение $\gamma_{л\text{пр}}$ с ростом z [8, 9], или весьма слабое влияние z на отношение $\gamma_{л\text{пр}}$ при высоких значениях этого отношения [3, 5, 6].

6. Неравномерность полей скоростей и углов, а также турбулентность потока в вихревых кромочных следах за сопловой решеткой повышает профильные потери рабочей решетки в $1,2 \dots 4,5$ раза ($\gamma_{л\text{пр}} = 1,2 \dots 4,5$) [3-10].

7. На отношение $\gamma_{л\text{пр}}$ может влиять число Струхала $Sh_{\text{л}} = (U/W_{2\text{г}})(b_{\text{л}}/t_c)$. Эксперименты, выполненные в институте Кармана [11], показывают, что потери в турбинной решетке зависят от чисел Re и $Sh_{\text{л}}$. При $Re \approx 2 \times 10^5$ и наличии отрыва потока в стационарных условиях вихревые кромочные следы подавляют отрыв и

коэффициент $\gamma_{лпр}$ может быть меньше 1. При $Re > 4 \times 10^5$ и безотрывном течении в решетке число Струхала не влияет на потери ($\gamma_{лпр} = 1$).

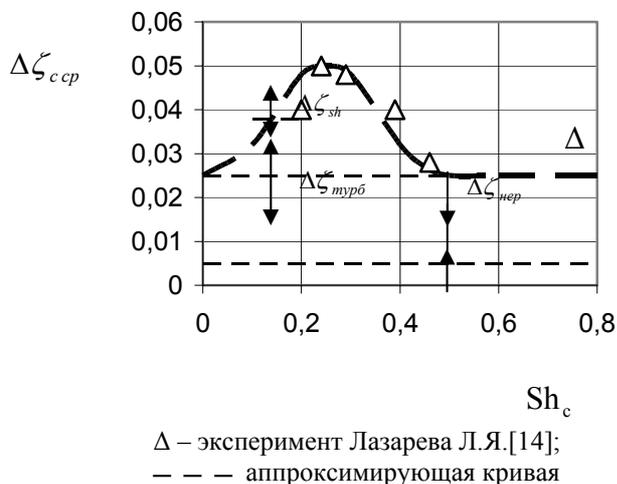


Рис. 1. Дополнительные потери в сопловой решетке

решетки С-90-12А при углах натекания $\alpha_0 = 60 \dots 120^\circ$ коэффициент $\zeta_{с пр} = 0,03 \dots 0,04$. Установка перед этой решеткой вращающегося РК повышает профильные потери в $\gamma_{с пр} = 1,6 \dots 2,7$ раза. Показано, что дополнительные профильные потери от периодической нестационарности $\Delta\zeta_{с ср} = \zeta_{с ср} - \zeta_{с пр}$ зависят от частоты вращения, достигая максимума при числе Струхала $Sh_c = (U / C_{1r})(b_c / t_{л}) = 0,25$, и определяются тремя взаимосвязанными факторами: числом Sh_c , тангенциальной неравномерностью и высокой степенью турбулентности за РК (рис. 1). По оценкам Лазарева Л.Я. турбулентность ($\approx 10\%$) повышает потери на 0,02, неравномерность – на 0,005, а число Sh_c – на $0 \dots 0,025$. При $Sh_c > 0,5$ влияние этого параметра на потери в соплах отсутствует.

Исследования НТУ «ХПИ» влияния входных условий на потери в РК

Сопловые решетки ступеней с одним и тем же РК имели одинаковые средний диаметр 175 мм, высоту 20 мм, шаг $t_c = 26,1$ мм, а отличались углами α_1 ($19^\circ, 27^\circ, 45^\circ$) и величиной потерь на среднем радиусе $\zeta_{с ср}$. Решетка стержней диаметром 3 мм устанавливалась перед РК и имела тот же шаг, что и сопловые решетки. Входной угол рабочей решетки на среднем радиусе β_{1r} составлял 60° , радиальный зазор над необандаженным РК – 0,22 мм.

С каждой из сопловых решеток и решеткой стержней РК испытывалось в широком диапазоне изменения режимных параметров β_1 и M_{2r} . Результаты испытаний четырех ступеней приведены в таблице.

Рассмотрим влияние вниз по потоку РК на сопловую решетку.

При испытаниях в НТУ «ХПИ» трехзвенника [12, 13], состоящего из переднего направляющего аппарата (ПНА), РК и заднего направляющего аппарата (ЗНА) было установлено, что даже при очень большом зазоре между РК и ЗНА (36 мм) интегральные потери в ЗНА в 2,5 раза выше интегральных потерь ПНА. При уменьшении зазора между РК и ЗНА до 9 мм отношение потерь повышается от 2,5 до 3,3.

Объектом испытаний, выполненных в МЭИ Лазаревым Л.Я. [14], была полуторная ступень, состоящая из двух неподвижных и одной вращающейся решеток. В условиях статических испытаний

Сопловая решетка с $\alpha_1 = 19^\circ$ – штатная сопловая решетка. При проектировании сопловых решеток с углами $\alpha_1 = 27^\circ$ и $\alpha_1 = 45^\circ$ моделирование тангенциальной неравномерности параметров перед РК осуществлялось с помощью параметров \bar{D}_w и $\Delta\beta$ [2]. Это привело к повышению потерь в сопловых решетках с ростом угла α_1 . Таким образом, рабочее колесо с тремя сопловыми решетками и решеткой стержней работало в условиях периодически нестационарного потока в широком диапазоне изменения углов α_1 и коэффициентов потерь сопла.

Таблица. Результаты испытаний ступеней

α_1	β_1	M_{2t}	Sh_n	$\zeta_l / \zeta_{лпр}$	$\Delta\zeta_l$
19	30	0,6	0,37	3,3	0,21
	30	0,9	0,33	1,8	0,12
	40	0,2	0,80	2,4	0,11
	50	0,2	1,00	2,2	0,07
	60	0,2	1,19	1,8	0,05
	60	0,9	0,66	3,0	0,04
27	30	0,6	0,10	4,9	0,35
	30	0,9	0,09	2,2	0,19
	40	0,2	0,36	4,0	0,24
	50	0,2	0,54	3,2	0,13
	60	0,2	0,71	1,7	0,04
	70	0,2	1,00	1,3	0,02
45	50	0,2	0,08	4,5	0,21
	60	0,9	0,13	7,0	0,12
	70	0,6	0,26	3,5	0,10
	70	0,9	0,19	7,0	0,11
90	99	1,1	0,05	1,15	0,02

Результаты эксперимента показывают, что на режимах с постоянными значениями режимных параметров β_1, M_{2t}, Re_{2t} совместное увеличение угла α_1 и потерь $\zeta_{с\text{cp}}$ существенно повышает интегральные потери в РК. Обозначим через ζ_l интегральные потери в РК при нулевом радиальном зазоре, а через $\gamma_{лк}$ отношение концевых потерь в нем при работе в составе ступени и в условиях, когда перед РК поток равномерный слаботурбулентный: $\gamma_{лк} = \zeta_{лк} / \zeta_{лкст}$. Для характеристики совместного влияния на ζ_l периодически нестационарных процессов и концевых потерь в таблице использована разность $\Delta\zeta_l = \zeta_l - \zeta_{лпр}$ и отношение $\zeta_l / \zeta_{лпр} = \gamma_{лпр} + \gamma_{лк} (\zeta_{лкст} / \zeta_{лпр})$, в котором второе слагаемое учитывает влияние концевых потерь. Далее $\Delta\zeta_l$

будем называть дополнительными потерями в РК.

Из анализа результатов испытаний также следует, что для моделирования в РК одинаковых значений $\Delta\zeta_l$ необходимо проектировать сопловые решетки с примерно одинаковым уровнем потерь $\zeta_{с\text{cp}}$. При увеличении угла α_1 соотношения между тремя факторами, упомянутыми выше [14], изменяются. Тангенциальная неравномерность потока в относительном движении ($\Delta\beta, \chi_{w_1}, \bar{D}_w$) снижается [2], роль числа Струхала повышается, а влияние степени турбулентности (сравнительно низкой перед РК) практически не меняется.

Из таблицы и рис. 2 видно, что число Sh_n снижается при уменьшении угла β_1 , росте числа M_{2t} и угла α_1 . Связь между этими параметрами выражается зависимостью

$$Sh_n = \frac{b_n}{t_c} \frac{W_{1a}}{W_{2t}} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_1} \right), \text{ в которой } \frac{W_{1a}}{W_{2t}} = \frac{\sin \alpha_1}{\sqrt{\sin^2 \alpha_1 + \frac{\rho}{(1-\rho)(1-\zeta_{с\text{cp}})}}}.$$

На режимах с постоянными значениями β_1 , M_{2t} , Re_{2t} отношение скоростей W_{1a}/W_{2t} сохраняется постоянным, что позволяет по указанной выше формуле рассчитать $Sh_{л}$ при изменении угла α_1 .

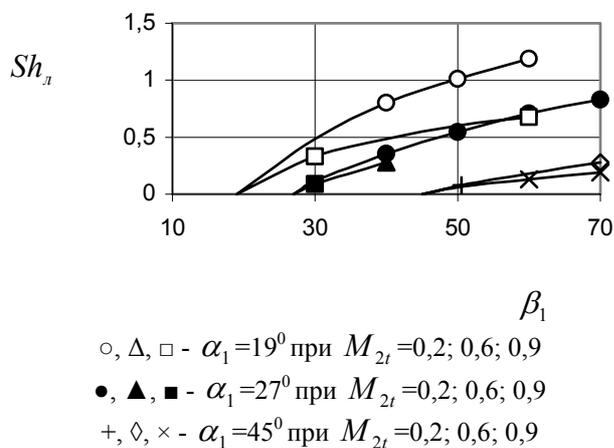


Рис. 2. Влияние углов α_1 и β_1 на $Sh_{л}$

При $\alpha_1 = const$, $\beta_1 = const$ увеличение степени расширения $ER = P_0^*/P_2$ повышает степень реактивности ρ и числа Маха M_{1t} , M_{2t} , что приводит к снижению отношения скоростей W_{1a}/W_{2t} и числа Струхала $Sh_{л}$.

Результаты экспериментальных исследований ступеней показали, что для любой из трех сопловых решеток, при уменьшении угла потока β_1 по сравнению с углом решетки $\beta_{1Г}$ величина $\Delta\zeta_{л}$ возрастает, а при увеличении угла β_1 (положительные углы атаки $\beta_1 - \beta_{1Г}$ – удар в выпуклую часть профиля) величина $\Delta\zeta_{л}$

уменьшается, достигая близких к нулю значений при углах атаки около 40° .

Эксперименты авторов статьи и Лазарева Л.Я. [14] позволили получить следующую формулу для определения дополнительных потерь $\Delta\zeta_{Sh}$ в сопловых и рабочих решетках турбин, обусловленных изменением числа Струхала (при $Sh > 0,5$ следует принимать $\Delta\zeta_{Sh} = 0$):

$$\Delta\zeta_{Sh} = 0,025 \left(1 - |1 - 4Sh|^{1,5} \right)^2.$$

Приведенные в таблице результаты удовлетворительно аппроксимируются формулой

$$\Delta\zeta_{л} = \zeta_{ср} + 46 \times 10^{-6} (\beta_1 - \beta_{1Г})(\beta_1 - \beta_{1Г} - 100) + 0,025 \left(1 - |1 - 4Sh_{л}|^{1,5} \right)^2,$$

которая обобщает результаты экспериментальных исследований РК в широком диапазоне углов атаки.

Основные выводы

1. Для определения дополнительных потерь в рабочем колесе средней веерности предложена эмпирическая зависимость, учитывающая потери в соплах, широкий диапазон углов атаки, число Струхала и экспериментально установленный авторами факт, что интегральные потери рабочего колеса в турбине в 1,15...7 больше, чем его профильные потери в идеализированных условиях обтекания равномерным слаботурбулентным потоком.

2. В отличие от известных эмпирических методик, в которых на режимах близких к расчетным ($\beta_1 \approx \beta_{1Г}$) определяется влияние периодической нестационарности на профильные потери, предлагаемая методика позволяет найти

дополнительные потери в рабочем колесе средней веерности для широкого диапазона углов атаки.

3. Установлено что, при изменении углов атаки от -30° до $+40^\circ$ дополнительные потери в рабочем колесе монотонно снижаются от максимальных значений до нуля.

Литература

1. Лим Ч.С., Лапузин А.В., Субботович В.П., Юдин Ю.А. Методика моделирования газодинамических процессов в высоконагруженных ступенях газовых турбин // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – №9, т. 12. – с. 186-190.

2. Лапузин А.В., Лим Ч.С., Субботович В.П., Юдин Ю.А. Моделирование тангенциальной неравномерности параметров потока перед рабочим колесом турбинной ступени // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – №9, т. 2. – с. 102-107.

3. Кирилов И.И. Теория турбомашин. – М.: Машиностроение, 1964. – 512 с.

4. Шубенко-Шубин Л.А., Стоянов Ф.А., Шубенко-Шубин А.Л. Об оценке профильных потерь в турбинной решетке, обтекаемой нестационарным потоком // Энергомашиностроение. – 1972. – № 1. – с. 7-9.

5. Зильберман А.С., Лопатицкий и др. Дополнительные потери энергии из-за периодической нестационарности в рабочих лопатках турбинных ступеней // Теплоэнергетика. – 1973. – № 10. – с. 55-59.

6. Копелев С.З., Тихонов Н.Д. Расчет турбин авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 268 с.

7. Герасименко В.П., Приходько А.В. Исследование влияния нестационарного потока на характеристики ступени осевого компрессора // Газовая динамика двигателей и их элементов. Тематический сборник научных трудов. – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1979. – с. 102-107.

8. Основы проектирования турбин авиадвигателей / А.В. Деревянко, В.А. Журавлев, В.В. Зикеев и др. / Под ред. С.З. Копелева. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

9. Кириллов И.И. Теория турбомашин. – М.: Машиностроение, 1972. – 536 с.

10. Шнез Я.И., Гаркуша А.В., Лапузин А.В. Исследование влияния отбора рабочего тела на экономичность двухступенчатой турбины // Сб. Энергетическое машиностроение. – Харьков, 1978. – Вып. 25. – с. 70-79.

11. Thomas C., Arts T., Lefebvre M., Liamis N., Roux J.-M. Unsteady and Calming Effects Investigation on very High Lift LP Turbine Blade. Part I: Experimental Analysis – Part II: Numerical Analysis // FSME International Gas Turbine Conference Turbo Expo 2002. GT-2002-30227>-2002-30228. – Amsterdam (Netherlands). – 2002.

12. Гребнев В.К., Левина М.Е., Чан Ши Фьет Взаимное влияние двух смежных ступеней // Сб. Энергетическое машиностроение. – Харьков. – 1973. – Вып. 16. – с. 22-28.

13. Чан Ши Фьет Исследование взаимного влияния смежных турбинных ступеней высокого давления: Автореф. дис... канд.техн.наук. – Харьков, 1973. – 24 с.

14. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.