УДК 621.165+621.438

Л. С. Гринкруг

ВЛИЯНИЕ ОСЕВОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ СТУПЕНЯМИ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПРЕДЫДУЩЕЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ

Приведен краткий анализ исследований влияния направляющего аппарата последующей ступени на КПД предыдущей ступени в зависимости от величины осевого зазора между ступенями турбины. Дано сравнение различных зависимостей по выбору величины межступенчатого расстояния, с которого начинается заметное влияние направляющего аппарата последующей ступени на экономичность предыдущей ступени.

Ключевые слова: осевой зазор между ступенями, КПД турбинной ступени.

Lev S. Grinkrug

AXIAL CLEARANCE BETWEEN THE STAGES AND ITS INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF THE TURBINE PREVIOUS STAGE

(Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

A brief analysis of the researches devoted to the influence of the guide apparatus of the next stage on the efficiency of the previous stage is presented in the article, The magnitude of the axial clearance between the turbine stages is taken into consideration. Comparison of different relations is given, depending on the values of inter-stage distance. It is where a significant influence of the guide apparatus of the next stage on the efficiency of the previous stage begins.

Key words: axial clearance between the stages, the efficiency of the turbine stage.

Снижение КПД группы ступеней по сравнению с КПД отдельно взятой ступени связано с взаимным влиянием двух смежных ступеней. Это влияние обуславливается:

- наличием за рабочим колесом (РК) предыдущей ступени лопаток направляющего аппарата (НА) последующей ступени, которые создают шаговую неравномерность потока в межступенчатом зазоре;
- наличием радиальной неравномерности потока за РК предыдущей ступени, обусловленной концевыми явлениями и утечками через периферийный и корневой зазоры;
- наличием нестационарности потока за РК предыдущей ступени, связанной с вращением лопаток РК относительно неподвижных лопаток последующего НА.

Первый фактор влияет на потери в предыдущей ступени, два других — в последующей. Это взаимное влияние зависит от формы профиля последующей направляющей решетки, отношения шагов РК преды-

Гринкруг Лев Соломонович — кандидат технических наук, доцент, ректор (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан), e-mail: rectorat@pgusa.ru

© Гринкруг Л. С., 2013

дущей ступени и НА последующей ступени, формы меридианных обводов проточной части и других параметров. Также очевидно, что взаимное влияние ступеней зависит от величины расстояния между ними, и с ростом межступенчатого расстояния должно ослабевать.

Потери в предыдущей ступени вследствие влияния последующей с ростом зазора между ступенями снижаются. Потенциальная неравномерность, формируемая последующей решеткой и влияющая на работу РК предыдущей ступени, с ростом зазора убывает по экспоненциальному закону [8]. Поэтому выбор осевого зазора между ступенями в этом случае сводится к нахождению такого приемлемого из конструктивных соображений межступенчатого зазора, когда падение КПД предыдущей ступени из-за влияния последующей достаточно мало (не превышает заданного допустимого значения).

Влияние величины межступенчатого расстояния на КПД последующей ступени неоднозначно. С одной стороны, с ростом межступенчатого зазора возрастают потери на выравнивание потока за РК предыдущей ступени, на трение о меридиональные ограничивающие поверхности, на подсос пассивного рабочего тела через корневой зазор между предыдущим НА и последующим РК или утечку активного рабочего тела в этот зазор.

С уменьшением межступенчатого зазора возрастают потери в НА и РК последующей ступени вследствие неравномерности и нестационарности потока, выходящего из РК предыдущей ступени. В работе [4], например, указывается, что есть все основания полагать, что потери на рабочих лопатках последующей ступени будут выше, чем на предыдущей, из-за искаженных условий течения рабочего тела за НА последующей ступени. Естественно, выше будет и уровень потерь собственно в НА последующей ступени.

Из-за противоречивого характера влияния зазора между ступенями на КПД отсека вероятно ожидать его оптимальную величину. На это указывает, например, и автор [2]. Вследствие взаимного влияния ступеней КПД отсека окажется ниже, чем КПД одной изолированной ступени (с учетом использования выходной энергии). Все это должно учитываться при проектировании группы ступеней.

Поток рабочего тела, выходящий из РК, имеет существенную неравномерность, которая усложняется дополнительными возмущениями, вносимыми НА последующей ступени. При этом происходит усложнение структуры потока в зазоре между ступенями. Характер вносимых возмущений определяется не только геометрией рабочих лопаток предыдущей ступени, но и конфигурацией входного участка НА последующей ступени и величиной осевого зазора (рис.1).

При малых значениях осевого зазора возмущения, вызываемые последующим НА, проникают в каналы рабочих лопаток, вызывая мгно-

венные срывы потока с выходных кромок рабочих лопаток предыдущей ступени, тем самым увеличивая потери в ней.

Уменьшение КПД предыдущей ступени вследствие влияния последующего НА отмечено в работах [1; 3; 4; 5; 6; 7].

В работе [1] отмечается, что на работу предыдущей ступени оказывают воздействие следующие факторы: максимальная толщина входной части профиля в окружном направлении последующего НА $\sigma_{\max}$; форма входной часта профиля, характеризующаяся коэффициентом $\frac{\sigma_{\max}}{L_2}$; шаг решетки последующего НА t_{1II}; межступенчатое расстояние δ_{z2}. Рекомендуется выбирать осевой зазор по критерию $\frac{\delta_{z2}^k}{\sigma_{\max}}$, где δ_{z2}^k – осевой зазор между ступенями в корневом сечении. По данным этой работы, $\frac{\delta_{z2}^k}{\sigma_{\max}}$ должно быть не менее 0,35. Исследования проводились на экспериментальных воздушных турбинах при значениях газодинамических критериев подобия $M_{c1} = 0{,}4$ и $\mathrm{Re}_{c1} = 0{,}5 \cdot 10^6$. Корневой осевой зазор между ступенями изменялся от 5 до 32 мм.

Авторы [1] отмечают, что основной неблагоприятный эффект последующей направляющей решетки выражается в значительном повышении потерь в рабочем колесе предыдущей ступени при малых величинах $\frac{\delta_{z2}^k}{\sigma_{\max}}$. Сильное возрастание потерь $\Delta\zeta_{2I}$ начинается со значения $\frac{\delta_{z2}^k}{\sigma_{\max}} < 0{,}5$. При этом потери в первом НА остаются практически неизменными.

Авторы [6] рекомендуют в качестве критерия для оценки влияния зазора на КПД отношение $\frac{\delta_{z2}}{d_{вх}}$ и рекомендуют принимать его величину в пределах 2,0…2,5. Отмечается, что экономичность ступени и коэффициент расхода при увеличении $\frac{\delta_{z2}}{d_{вх}}$ более 2,5 не изменяются.

В работе [7] отмечается, что удлинение входной кромки последующего НА, составленного из узких нормализованных профилей, с целью увеличения их прочности приводит к практическому отсутствию влияния последующего НА на эффективность ступени. Кроме того, отклонение потока от осевого направления при натекании на направляющие лопатки с удлиненной входной частью в пределах ±15° не приводит к падению КПД.

В работе [3] на основании экспериментальных исследований с траверсированием потока как за НА, так и за РК установлено, что основное влияние уменьшение величины осевого зазора между ступенями оказывает на увеличение концевых потерь энергии при практически неизменных профильных потерях.

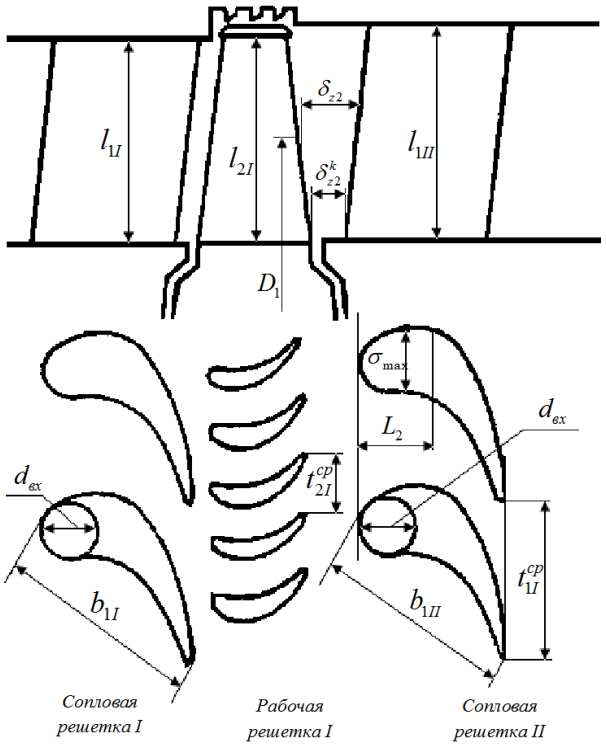


Рис. Схема трехзвенного отсека

В корневой части лопаток, где расстояние до следующей направляющей решетки особенно мало, уменьшение зазора приводит к повышенной неравномерности потока и, следовательно, к увеличению потерь с выходной скоростью. При этом потери на рабочих лопатках составляют основную долю в общем балансе потерь. Они резко возрастают при уменьшении расстояния до направляющей решетки следующей ступени и увеличении толщины профиля ее лопаток. Зависимость профильных и концевых потерь энергии на рабочих лопатках предлагается оценивать от относительного межступенчатого расстояния $\frac{\bar{\delta}_{z2}}{\bar{\sigma}_{\max}}$ (где $\bar{\delta}_{z2} = \frac{\delta_{z2}}{b_{1II}}$, $\bar{\sigma}_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{t_{1II}}$). Коэффициент потерь в НА первой ступени при этом практически не изменяется. Необходимо отметить, что в этой работе к концевым потерям отнесены и потери от утечек через радиальные зазоры надбандажного уплотнения.

По данным исследований [4,] влияние зазора на КПД ступени начинается с расстояния $\frac{\bar{\delta}_{z2}}{\bar{\sigma}_{\max}}$, равного 0,7…0,8. При этом основную долю потерь в трехзвенном отсеке составляют потери на лопатках РК, и они

резко возрастают при уменьшении $\frac{\bar{\delta}_{z2}}{\bar{\sigma}_{\max}}$ от 1,2 до 0,2. Коэффициент потерь последующей направляющей решетки возрос приблизительно в 1,4 раза с уменьшением $\frac{\bar{\delta}_{z2}}{\bar{\sigma}_{\max}}$ от 1,9 до 0,2. Но и при самых больших величинах межступенчатого зазора коэффициент потерь направляющей решетки, расположенной за РК, оказывается в несколько раз больше, чем у направляющей решетки, у которой на входе обеспечен равномерный поток. Следовательно, увеличение межступенчатого расстояния не может полностью ликвидировать эффект взаимного влияния ступеней. Наиболее резко при уменьшении расстояния между ступенями возрастают потери в РК. Уменьшение $\frac{\bar{\delta}_{z2}}{\bar{\sigma}_{\max}}$ в два раза от 0,4 до 0,2 приводит к возрастанию потерь в 1,5 раза.

А. С. Ласкин [9] в качестве универсального критерия влияния зазора между ступенями рекомендует применять выведенный им параметр S, пропорциональный величине неравномерности потока перед решетками НА:

$$S = \left[\frac{d_{вх}}{2t_{1II}} + 0{,}133 \frac{\sigma_{\max}}{L_2} \left(1 - \frac{d_{вх}}{\sigma_{\max}} \right)^{0,5} \right] \exp\left(\frac{-2\pi\delta_{z2}}{t_{1II}} \right)$$

Критерий S при допустимой величине снижения эффективности $\Delta\eta$ не более 0,2 % рекомендуется принимать не более 0,01. При этом величина осевого зазора между ступенями определяется по формуле:

$$\delta_{z2} = -\frac{t_{1II}}{2\pi} \ln \frac{0{,}01}{d_{вх}/(2t_{1II}) + 0{,}133 \cdot \sigma_{\max} / L_2 \cdot (1 - d_{вх}/\sigma_{\max})^{0,5}}$$

Авторами [10] даны рекомендации выбора δ_{z2}, обеспечивающие уменьшение возмущающего влияния входных кромок НА последующей ступени на поток в предшествующей ступени. Оптимальная величина δ_{z2} определяется по формуле:

$$\delta_{z2} = (2{,}6 \div 4{,}5) \cdot \frac{d_{вх}}{2}$$

Как видно, различными авторами даются противоречивые рекомендации по выбору величины осевого зазора между предыдущей ступенью и последующим НА. По параметрам трехзвенного отсека № I, испытанного в работе [1], была подсчитана величина межступенчатого расстояния, с которой начинается заметное влияние последующего НА на КПД предыдущей ступени (данное расстояние можно считать оптимальным для выбора осевого зазора из соображений экономичности предыдущей ступени). Параметры отсека приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры трехзвенного отсека № I [1]

Первый НА				**Первый РК**					**Второй НА**						
l_{1I}	b_{1I}	t_{1I}^{cp}	α_{1I}^{cp}	l_{2I}	b_{2I}	t_{2I}^{cp}	β_{2I}^{cp}	$\frac{D_{2I}}{l_{2I}}$	l_{1II}	b_{1II}	t_{1II}^{cp}	α_{1II}^{cp}	$d_{вх}$	$\sigma_{\max}$	$\frac{\sigma_{\max}}{L_2}$
мм	мм	мм	град	мм	мм	мм	град	–	мм	мм	мм	град	мм	мм	–
51,0	76,1	57,6	13°30'	52,8	30,0	18,7	19°40'	8,34	55,1	76,1	57,6	13°34'	8,7	26,8	1,155

Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина межступенчатого расстояния, рассчитанная по данным разных авторов

№ пп	**Источник**	**Формула**	**Результат**
1	[1]	$\delta_{z2}^{k} = 0{,}5\sigma_{\max}$	13,4 мм
2	[6]	$\delta_{z2} = (2...2{,}5)d_{вх}$	17,4…21,8 мм
3	[4]	$\delta_{z2} = (0{,}7...0{,}8)\frac{\sigma_{\max}\cdot b_{1II}}{t_{1II}}$	24,8…28,3 мм
4	[9]	$\delta_{z2} = \frac{-t_{1II}}{2\pi}\ln\frac{0{,}01}{\frac{d_{вх}}{2t_{1II}} + 0{,}133\frac{\sigma_{\max}}{L_2}\left(1-\frac{d_{вх}}{\sigma_{\max}}\right)^{0{,}5}}$	26,5 мм
5	[10]	$\delta_{z2} = (2{,}6 \div 4{,}5)\cdot\frac{d_{вх}}{2}$	11,3…19,6 мм

Как видно из табл. 2, результаты расчета по различным зависимостям отличаются в 2,5 раза. Так как зависимости [1], [4], [6] получены экспериментально, то разброс, по-видимому, обусловлен факторами, зависящими от параметров модельных ступеней и условий экспериментов. Имеется хорошее совпадение между зависимостью [4] и теоретической формулой А. С. Ласкина [9].

Список литературы

1. *Вольфсон И. Н., Гребнев В. К., Левина И. Е. и др.* Влияние сопловой решетки на работу предыдущей ступени // Теплоэнергетика. I974. № 6. с. 53—55.
2. *Гоголев И. Г.* Зависимость КПД двухступенчатого отсека турбины от расстояния между ступенями // Теплоэнергетика. 1974. № 3. С. 20—21.
3. *Гребнев В. К., Левина М. Б., Чан Ши Фьет.* Влияние последующей сопловой решетки на распределение потерь по высоте ступени // Энергетическое машиностроение. 1973. вып. 16. С. 14—21.
4. *Гребнев В. К., Левина М. Е., Чан Ши Фьет.* Взаимное влияние двух смежных ступеней // Энергетическое машиностроение. 1973. вып. 16. С. 22—28.
5. *Гринкруг Л. С.* Расчет КПД малорасходных турбин методом модельных ступеней с использованием результатов испытаний натурных турбин // Вестник Дальневосточной государственной социально-гуманитарной академии. № 2(9)2011. С. 41—44.
6. *Косяк Ю. Ф., Соболев СП., Юшкевич Ю. Э. и др.* Выбор осевого зазора между ступенями турбины // Теплоэнергетика. 1973. № 3. С. 17—18.

7. *Терентьев И. К., Юшкевич Ю. Э., Гольман В. И. и др.* Экспериментальное исследование ступени ВД с направляющими лопатками повышенной прочности // Энергомашиностроение. 1972. № 4. С. 6—8.
8. *Самойлович Г. С.* Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
9. *Гринкруг Л. С., Ласкин А. С., Раков Г. Л., Рассохин В. А.* Отчет о НИР Аэродинамическое совершенствование проточных частей перспективных паровых и газовых турбин, включая отработку высоконагруженных ступеней, последних ступеней ЦНД и радиально-осевых ступеней для ЦНД мощных паровых турбин. Наименование отчета Влияние осевых зазоров между ступенями на эффективность турбины из нескольких ступеней. Шифр темы/№ работы 323152. № гос. регистрации 0182.3004162, инв. номер № 0285.0 038800. Ленинград, 1984. 29 с.
10. А. с. 551447 СССР, М. Кл.2 F01D1/04. Проточная часть турбины / И. К. Терентьев, Ю. А. Марченко, М. В. Бакурадзе (СССР). Опубл. 25.03.77. Бюл. № 11.

* * *