

УДК 621.515

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

В.Г. Прокопович

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Представлены результаты опытного исследования влияния величины зазора между торцом рабочей лопатки и корпусом на характеристику осевого компрессора. Приведено описание экспериментального стенда, объекта исследования, методики проведения опытов. Подтверждено существенное ухудшение характеристик рабочего колеса компрессора по мере увеличения радиального зазора, сопровождающееся падением напора и КПД, а также сужением диапазона бесрывной работы. Дано сравнение с опытными данными других авторов.

* * *

Представлено результати експериментального дослідження впливу величини зазору між торцем робочої лопатки і корпусом на характеристику осьового компресора. Наведено опис експериментального стенда, об'єкта дослідження, методики проведення дослідів. Підтверджено істотне погіршення характеристик робочого колеса компресора в міру збільшення радіального зазору, що супроводжується падінням напору та ККД, а також звуженням діапазону стійкої роботи. Дається порівняння з дослідними даними інших авторів.

* * *

The Presented results of the experienced study of the influence of the value of the clearance between butt end worker blades and body on feature of the axial compressor. Happens to the description of the experimental stand, object of the study, methods of the undertaking experience. The essential deterioration of the features worker travel about compressor is Confirmed on measure of the increase the radial clearance, being accompanied fall of the pressure and efficiency, as well as narrowing the range of the firm work. The comparison is given from experienced given other authors.

Структура потока в осевом компрессоре (вентиляторе) и его аэродинамические характеристики сильно зависят от величины радиального зазора между торцами рабочих лопаток и статором. Особую актуальность проблеме придает тот факт, что в процессе эксплуатации многоступенчатых компрессоров в системе газотурбинных двигателей радиальный зазор постоянно меняется в зависимости от изменения частоты вращения ротора и температуры воздуха. В частности, относительные значения радиальных зазоров на последних ступенях достигают достаточно больших значений (5...9% высоты рабочей лопатки и более), что негативно влияет на параметры компрессора и двигателя в целом. Вопрос влияния величины радиального зазора не менее актуален для осевых вентиляторов с поворотными лопатками, в которых переход на большие углы установки рабочих лопаток сопряжен с существенным увеличением зазора и, как следствие, ухудшением

их параметров. Получившие широкое распространение на практике так называемые истираемые покрытия статора компрессора в процессе длительной эксплуатации подвержены механической выработке в надроторной области, что также увеличивает зазор и негативно отражается на характеристиках компрессора. В этой связи опытные исследования влияния радиального зазора на параметры осевого компрессора актуальны и представляют большой практический интерес.

Более того, выполненные на данный момент немногочисленные экспериментальные исследования, посвященные этому вопросу [1-3 и др.], проводились на разных объектах, с использованием различного измерительного инструментария, различных методик проведения опытов. Отсюда рекомендуемые эмпирические поправки на величину зазора, полученные разными авторами, дают зачастую существенно различающиеся результаты. Появившиеся в

последнее время теоретические методы также не отличаются надежностью и требуют накопления экспериментального материала на опытных объектах самого широкого спектра аэродинамических характеристик.

Поэтому в большинстве посвященных этой проблеме опубликованных работ наряду с чрезвычайной сложностью задачи отмечается настоятельная необходимость продолжения исследований в этом направлении [3.4 и др.]. При этом особый интерес представляют широко применяемые на практике высоконапорные компрессорные ступени, как правило, с выраженными пространственными эффектами в их лопаточных венцах.

Представленные в статье материалы являются частью комплексного расчетно-экспериментального исследования, выполняемого в рамках госбюджетной темы и посвященного исследованию течения в периферийной области рабочего колеса осевого компрессора, включая актуальнейшую проблему влияния радиального зазора на его аэродинамическую характеристику. В качестве объекта исследования была выбрана двухзвенная (рабочее колесо, направляющий аппарат) с осевым входом и выходом модельная ступень высоконапорного вентилятора С12-1,5. Степень реактивности на среднем радиусе $\tau = 0,77$, расчетный коэффициент теоретиче-

ского напора $\bar{H}_T = 0,30$ при коэффициенте расхода $\bar{C}_a = 0,41$.

Для проведения опытных исследований был специально реконструирован и подготовлен стенд одноступенчатого осевого компрессора ТМ-01 лаборатории кафедры № 201 Национального аэрокосмического университета, схема которого показана на рис. 1. Плавно очерченный входной коллектор 2 с выравнивающей сеткой обеспечивает равномерное в радиальном и окружном направлениях поле параметров на входе в ступень компрессора. Рабочее колесо 6 через трансмиссию приводится во вращение балансирным электродвигателем 10, обеспечивающим плавную регулировку частоты от 0 до 4500 об/мин и измерение потребляемой мощности с помощью весового устройства 11. Плавное изменение режима работы ступени по расходу осуществлялось кольцевым дросселем 8 в системе выходного воздухохранилища 9.

Получение разных радиальных зазоров ($\bar{\Delta}_r = 0,6, 1,6, 2,6$ и $4,6\%$) осуществлялось с помощью сменных наборных модулей статора 4, внутренний диаметр которых при этом менялся от 400 до 408 мм. Плавное сопряжение внутренней поверхности модулей с входным конфузуром 3 обеспечивала специальная коническая вставка.

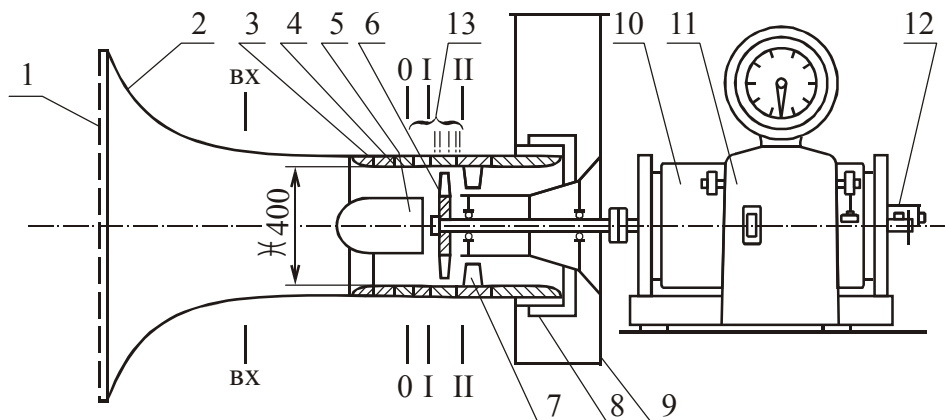


Рис. 1. Схема стенда для испытания ступени компрессора: 1 – выравнивающая сетка; 2 – коллектор; 3 – конфузор рабочей части; 4 – сменные вставки; 5 – обтекатель; 6 – рабочее колесо; 7 – направляющий аппарат; 8 – дроссель; 9 – воздухохранилище; 10 – балансирный электродвигатель; 11 – весовое устройство; 12 – импульсный счетчик частоты вращения; 13 – пневмоотборы; вх-вх, 0-0, I-I, II-II – мерные сечения

Все экспериментальные исследования выполняли в соответствии с рекомендациями отраслевых руководящих материалов (РТМ 1597-79) при окружных скоростях по концам рабочих лопаток $U_k = 86 \text{ м/с}$, в области автомодельности по числу Рейнольдса ($Re = 2,35 \cdot 10^5 \dots 3,95 \cdot 10^5$).

В процессе испытаний при указанных выше величинах радиальных зазоров снимали аэродинамические характеристики рабочего колеса и фиксировали границу устойчивой работы компрессора.

Расход воздуха через компрессор измеряли в мерном коллекторе на входе в стенд (сечение «вх-вх» на рис. 1) и дублировали измерением непосредственно перед ступенью (сечение «0-0»).

Изоэнтropicкий напор измеряли с помощью пятипоясных радиальных гребенок полного давления перед и за рабочим колесом (сечение «I-I» и «II-II» на рис. 2,а). Не ориентируемую входную гребенку (позиция «П₁» на рис. 2,б), изготовленную из медицинских игл Г-образной конфигурации, устанавливали параллельно оси стенда (крутка потока на входе не превышала $1 \dots 3^\circ$ на всех режимах испытаний). Выходную гребенку (позиция «П₂») дополнительно ориентировали по экспериментальному углу выхода потока на среднем радиусе, что гарантиро-

вало надежное измерение максимального полного давления за колесом.

Границу устойчивой работы компрессора фиксировали по резкому изменению давления на входе в стенд, сопровождавшемуся характерным низкочастотным шумом.

В целях обеспечения приемлемой точности получаемых при снятии характеристик результатов эксперимент для каждого варианта испытаний (значений $\bar{\Delta}_r$) многократно повторяли с последующей аппроксимацией полученных результатов.

Выполненные исследования подтвердили существенное влияние увеличения радиального зазора между торцами рабочих лопаток и корпусом в осевом компрессоре на его аэродинамическую характеристику (рис. 3). Наблюдается заметное снижение изоэнтropicкого напора, потребляемой компрессором мощности и его КПД.

На рис. 3,а показаны относительные (по сравнению с исходным вариантом испытаний $\bar{\Delta}_r = 0,6\%$) изменения основных параметров рабочего колеса (коэффициента изоэнтropicкого \bar{H}_s^* и теоретического \bar{H}_T напоров, изоэнтropicкого КПД η_s^*) в зависимости от величины радиального зазора. Как

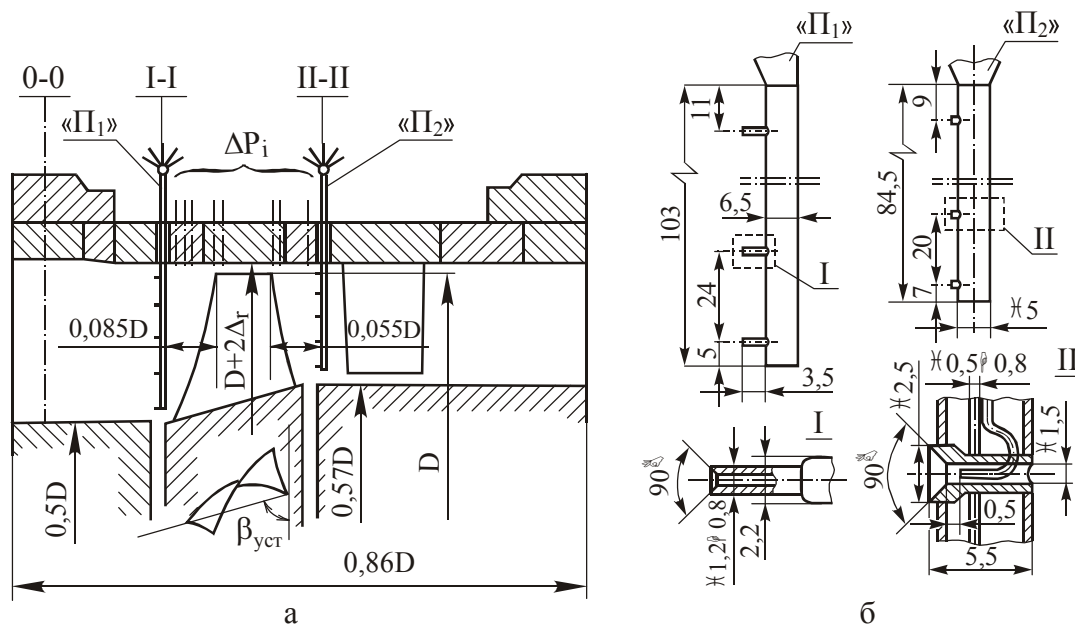


Рис. 2. Схемы рабочих частей: а – стенда; б – пневмоприемников

следует из приведенных графиков, влияние увеличения зазора на развиваемый рабочим колесом изотропический напор (повышение полного давления) существенно превосходит аналогичное воздействие на теоретический напор (потребляемую мощность), что и обуславливает, в конечном итоге, снижение его КПД. В отличие от [1,3] для испытанного объекта исследования влияние режима по расходу на эти изменения не столь заметно.

Значительное уменьшение диапазона бесрывной работы A при увеличении зазора (рис. 3,б) происходит в основном вследствие смещения точки

разрыва характеристики $\bar{C}_{a \text{ гур}}$ в сторону больших расходов, где $A = (\bar{C}_{a \text{ max}} - \bar{C}_{a \text{ гур}}) / \bar{C}_{a \text{ гур}} \cdot 100\%$.

Как следует из приведенных графиков, примерно четырех - кратное по сравнению с исходным увеличение радиального зазора привело к снижению КПД на 4% и сужению рабочего диапазона характеристики на 40%. Важно отметить, что сужение области устойчивой работы ступени при зазорах, превышающих 2,5%, заметно ослабевает, а снижение развиваемого колесом напора, равно как и падение КПД, продолжается на том же уровне.

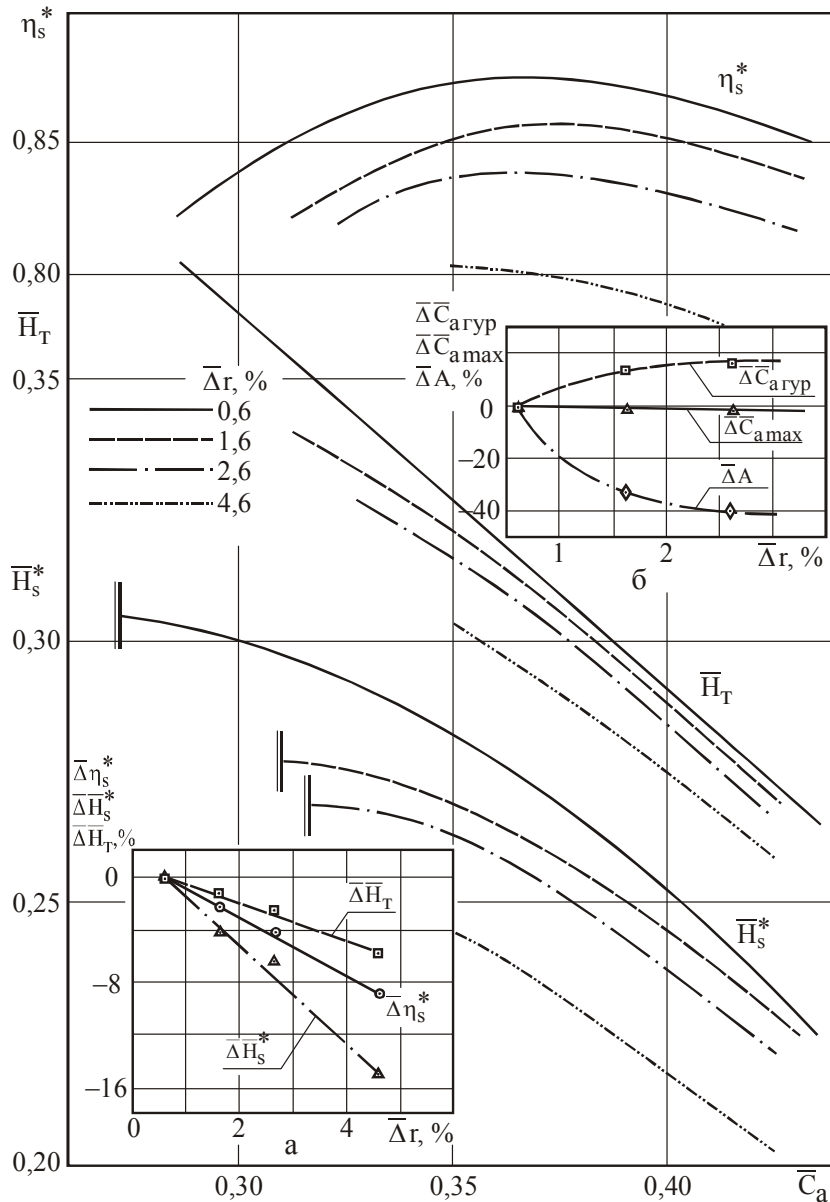


Рис. 3. Аэродинамические характеристики рабочего колеса ступени С12-1,5 при разных зазорах

Интенсивность снижения КПД рабочего колеса при увеличении радиального зазора иллюстрирует график на рис. 4. Отложенное по оси ординат изменение КПД рабочего колеса подсчитывали в данном случае относительно его гипотетического значения при нулевом зазоре, полученного экстраполяцией.

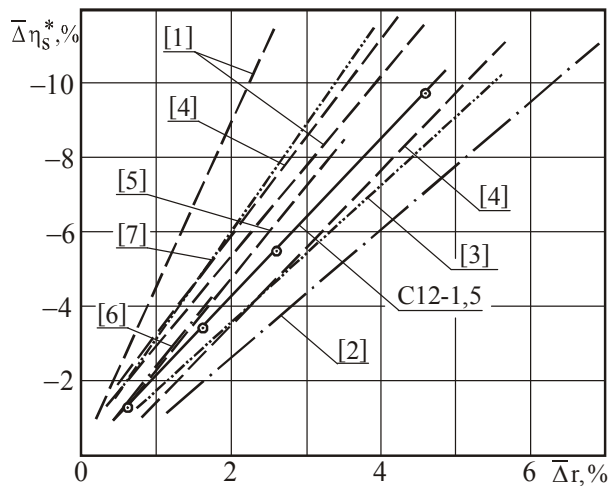


Рис. 4. Влияние радиального зазора на КПД рабочего колеса

Там же дается сравнение с результатами других авторов [1-7]. Графики соответствуют режиму максимального (или близкого к нему) КПД при исходном радиальном зазоре. Нетрудно убедиться, что для большинства испытанных объектов эта величина колеблется от 1,5 до 3,0% падения относительного КПД на 1% увеличения относительного радиального зазора. Для испытанной ступени С12-1,5 эта величина составляет 2,1% и может характеризоваться близкой к среднему обобщенному уровню интенсивности изменения данного параметра.

Заключение

Таким образом, подтверждена актуальность проблемы влияния радиального зазора на характеристику осевого компрессора, а также обусловленная этим необходимость углубленного исследования потока в его периферийной области. Дальнейшие работы предполагают подбор [2] и опытную проверку альтернативной конструктивной схемы исполнения радиального зазора в целях повышения эффективности рабочего колеса, а также детальное

параметрическое исследование воздействия надротного устройства на поток в условиях естественного и утолщенного пограничных слоев на входе.

Литература

1. Колесников А.В. Влияние зазора между колесом и кожухом на характеристику осевого компрессора // Промышленная аэродинамика. – 1960. – Вып. 17. – С. 20–28.
2. Ефименко А.П., Незым В.Ю., Никишов А.А., Прокопович В.Г. Опытная оценка влияния надротных устройств типа СКВ на характеристики колеса компрессора // Газовая динамика двигателей и их элементов. – Харьков: ХАИ, 1987. – С. 4–10.
3. Иноуз, Куроумару, Фукухара. Экспериментальное исследование протекания газа через радиальный зазор в осевом компрессоре // Тр. америк. общ. инж.-мех. Энергетические машины и установки. – 1985. -№1. – С 6–14.
4. Лакшминараяна. Методы расчета влияния радиального зазора в осевых турбомашинах // Тр. америк. общ. инж.-мех. Энергетические машины и установки. – 1970. – №1. – С. 64–89.
5. Гофлин А.П. Аэродинамический расчет проточной части осевых компрессоров для стационарных установок. – М.: Машгиз, 1959. – 303с.
6. Холщевников К.В., Емин О.В., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 431 с.
7. Зверева Г.Н., Савин Н.М. Эффективность применения кольцевых проточек в корпусе рабочего колеса ступени осевого компрессора // Газовая динамика двигателей и их элементов. – Харьков: ХАИ, 1983. – Вып.2. – С. 96–101.

Поступило в редакцию 12.03.03

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент Хоменко А.С., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; канд. техн. наук, начальник отдела газотурбинного наддува и газовых систем Анимов Ю.А., КП «Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению», г. Харьков.