

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф., Ю.Н. ГОВОРУЩЕНКО, канд. техн. наук,
А.П. УСАТЫЙ, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНОЕ РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ОТСЕКА ВОЗДУШНОЙ ТУРБИНЫ

Виконана робота по експериментальному тестуванню створених математичних моделей розрахунку осьових турбін з метою вдосконалення і подальшого їх використання в задачах оптимального проектування та в САПР. Спроектовано, виготовлено, та експериментально досліджено двохступеневий відсік повітряної турбіни. Підтверджено високий ступінь надійності та достовірності використаних під час проектування та розрахунків математичних моделей, що дозволяє використовувати створені математичні моделі для вирішення задач оптимального проектування відсіків осьових турбін.

При создании подсистемы оптимального проектирования осевых турбин, как составной части САПР турбоагрегата, особое внимание приходится уделять надежности и достоверности используемых для этих целей математических моделей. Решению этой задачи посвящены многие работы, выполненные и выполняемые в настоящее время на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» [1-3]. Одним из надежных и эффективных способов оценки достоверности, а также совершенствования используемых математических моделей с целью их использования в процедурах оптимального проектирования и оценочных расчетах является всестороннее сравнительное исследование объектов проектирования или их моделей на вычислительных и натурных экспериментальных стендах.

Проведенные предварительные расчетные исследования по оптимизации отдельных ступеней показали, что условия их работы в отсеке (группе) могут существенно отличаться и часто не соответствовать оптимальным параметрам, полученным для изолированных ступеней. Именно поэтому было принято решение расширить объем теоретических, расчетных и экспериментальных исследований по созданию расчетного комплекса математических моделей, обеспечивающих решение задач оптимального проектирования многоступенчатых отсеков, с учетом влияния на эффективность работы его ступеней максимально возможного количества конструктивных и термогазодинамических параметров.

В данной работе в качестве объекта исследования был принят двухступенчатый отсек воздушной турбины, состоящий из ступеней, являющихся моделями 2-й и 3-й ступени ($D_{\text{ф}}/l=14,1$) ЦВД турбины К-500-65/3000 ОАО «Турбоатом». Масштаб моделирования составлял 1:4,18. Направляющие аппараты ступеней выполнены из лопаток, профиль которых образован из профиля ТС-1А-В. Решетки рабочих колес состоят из профилей активного типа Р-2, заимствованных из атласа ЦКТИ и повернутых на 2° в сторону увеличения угла выхода потока. Геометрические характеристики ступеней даны в таблице 1.

Количество ступеней исследуемого отсека диктовалось возможностью экспериментального оборудования кафедры турбиностроения ХПИ. Данный отсек был выбран в качестве исходного варианта и при его исследовании решались две задачи:

1. определение эффективности и основных термогазодинамических характеристик течения рабочего тела через отсек, которые послужили бы базой для сравнения с оптимальным вариантом двухступенчатого отсека, спроектированного на эти же параметры;

2. проверка созданных математических моделей расчета проточных частей осевых турбин и получение экспериментального подтверждения соответствия физической картины течения рабочего тела в отсеке и, при необходимости, введение уточнений в разработанные математически модели с учетом результатов эксперимента.

Таблица 1 Геометрические характеристики первой ступеней двухступенчатого отсека

П а р а м е т р ы	Направляющий аппарат		Рабочее колесо	
	1-я ступень	2-я ступень	1-я ступень	2-я ступень
Хорда ϵ , мм	31,8	31,8	16	16
Угол установки, β_y	59°	59°	75°22	75°22
Относительный шаг $\bar{t} = t/b$	0,508	0,514	0,716	0,722
Относительная длина $\bar{l} = l/b$	0,612	0,786	1,44	1,69
Число лопаток z	68	68	96	96
Горло a , мм	3,66	3,68	4,184	4,186
$\arcsin a_{изм}/t$	13°0	13°02	21°10	21°15

Решение поставленных задач осуществлялось поэтапно:

- расчетные исследования и проектирование исследуемого объекта с использованием созданных математических моделей расчета проточной части осевых турбин;
- изготовление экспериментального образца объекта;
- проведение экспериментальных исследований отсека на воздушной турбине;
- сравнительный анализ результатов численных и экспериментальных исследований;
- совершенствование разработанных математических моделей;
- выводы и рекомендации.

Предпроектные расчеты, а также проектирование и расчетные исследования исходного двухступенчатого отсека проводились на одно- и двумерных математических моделях газодинамического расчета в прямой и обратной постановках [1, 2, 3] с использованием методики расчета составляющих потерь энергии, позволяющей учитывать влияние основных термодинамических и конструктивных параметров. Применительно к расчету рассматриваемого отсека принимались во внимание гидравлические потери в сопловой и рабочей лопатках, с выходной скоростью, от диафрагменной и надбандажной утечек, трения диска и в осевом зазоре. В случаях, когда это необходимо, могут быть учтены дополнительные потери от выколачивания, влажности, влияния скрепляющей проволоки, в необандаженных лопатках и других факторов.

В соответствии с данными Табл. 1 были изготовлены две ступени турбинного отсека, а также осуществлена модернизация проточной части воздушной турбины ВТ-3 лаборатории турбостроения НТУ «ХПИ». Принципиальная схема экспериментального стенда приведена в [4]. Стенд включает в себя воздушную турбину, гидротормоз, нагнетательный трубопровод с успокоительным баком, выхлоп и контрольно-измерительную аппаратуру. Спроектирован и изготовлен исходный вариант проточной части турбины (Рис. 1), представляющий собой двухступенчатый отсек, состоящий из

корпуса 1, подводящего патрубка 2, установленного с возможностью осевого и вращательного перемещений относительно корпуса. В расточке подводящего патрубка установлен направляющий аппарата 3 первой ступени, жестко соединенный с помощью винтов 4 с направляющим аппаратом 6 второй ступени. Рабочие колеса 7, 8 первой и второй ступеней закреплены с помощью гайки 9 и дистанционных колец 10, 11 на втулке 12, которая через радиальные шпонки связана с консольным валом 13. Над бандажными полками рабочих колес установлены сменные уплотнительные кольца 14, 15. Диафрагма направляющего аппарата второй ступени вместе с дистанционным кольцом 10 образуют прямоточное лабиринтовое уплотнение. Для предотвращения утечек тела через зазор между корпусом 1, подводящим патрубком 2 и обоймой направляющего аппарата 6 второй ступени установлены фторопластовые уплотнительные пояски 16. В дисках рабочих колес выполнены разгрузочные отверстия 18, которые при необходимости могут закрываться пробками. Представленный на Рис. 1 вариант сборки отсека характеризуется штатными (4 мм) межкромочными осевыми зазорами и предназначен для изучения интегральных мощностных характеристик турбины.

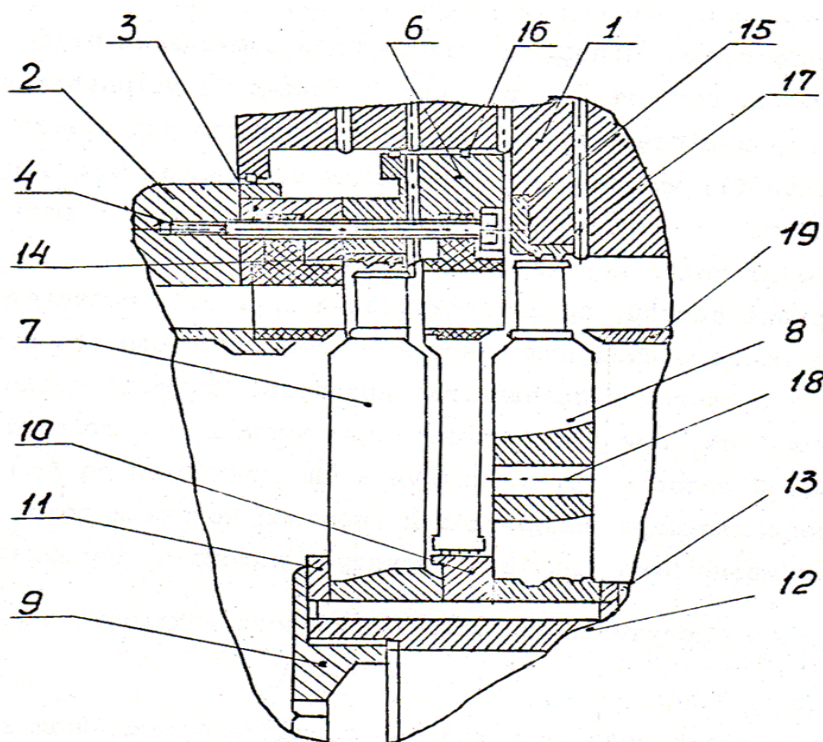


Рис. 1 – Проточная часть двухступенчатого отсека

Условия проведения расчетных исследований соответствовали условиям эксперимента: $P_0^* = 160 \text{ кПа}$, $T_0^* = 380^0 \text{ К}$, $P_2 = 100,1 \text{ кПа}$, $G = 1,36 \text{ кг/с}$.

В процессе исследований изучалось и сравнивалось влияние на внутренний относительный КПД двухступенчатого отсека радиальных надбандажные зазоров ступеней, зазора диафрагменного уплотнения 2-й ступени и отношения скоростей $(U/C_0)_{\text{отс}}$ отсека.

Методика проведения эксперимента и обработки данных принципиально не отличается от изложенной в работе [5].

На Рис. 2, 3 представлены данные опытных и расчетных исследований по влиянию на КПД двухступенчатого отсека режимного параметра – $(U/C_0)_{отс}$ при различных значениях зазоров надбандажных ($\delta_{р.3.1} = \delta_{р.3.2} = (0,5; 0,8; 1,5)$ мм) и диафрагменного ($\delta_{д.3.2} = (0,5; 1,0; 1,5)$ мм) уплотнений. Как видно из рисунков качественный характер кривых, полученных расчетным и экспериментальным путем, совпадает практически на всех режимах и при всех сочетаниях конструктивных факторов. В то же время, следует отметить тот факт, что с увеличением радиальных надбандажных и диафрагменного зазора второй ступени наблюдается тенденция к увеличению расхождения расчетного и экспериментального значений КПД. Принимая во внимание тот факт, что конкретные значения увеличенных радиальных надбандажных и диафрагменных зазоров в основном определялись возможностями экспериментального стенда и при обратном масштабировании, применительно к реальному объекту (2-й и 3-й ступени ЦВД турбины К-500-65/3000 ОАО “Турбоатом”) реальные зазоры ближе всего соответствуют наименьшему уровню этих зазоров в

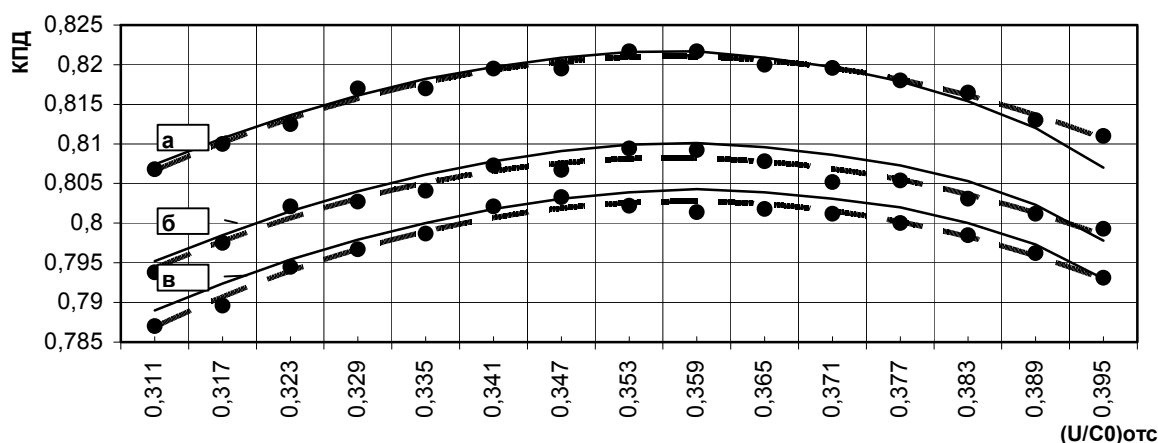


Рис. 2 – Зависимости внутреннего КПД двухступенчатого отсека от отношения скоростей при $\delta_{р.3.1} = \delta_{р.3.2} = 0,5$ мм: а - $\delta_{д.3.2} = 0,5$ мм; б - $\delta_{д.3.2} = 1,1$ мм; в - $\delta_{д.3.2} = 1,5$ мм.

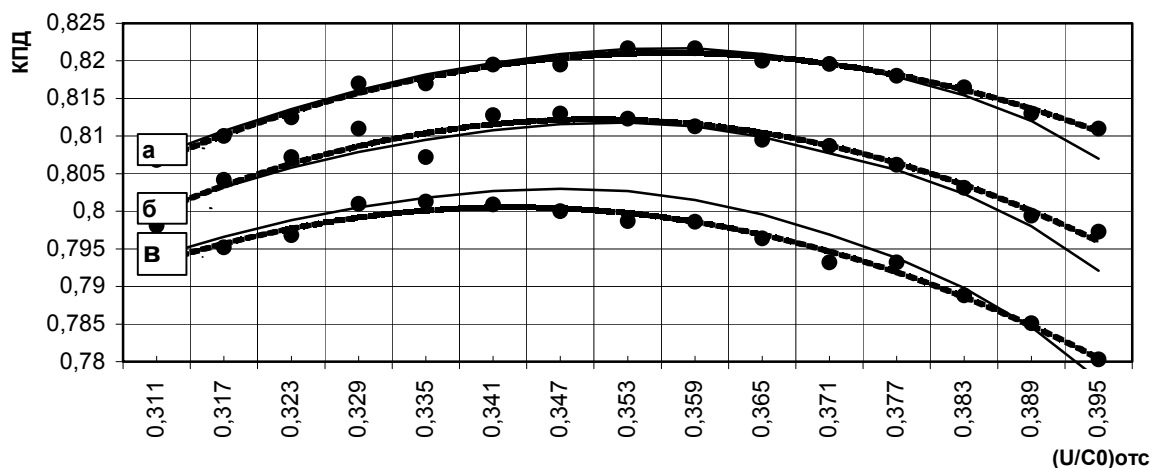


Рис. 3 – Зависимости внутреннего КПД двухступенчатого отсека от отношения скоростей при $\delta_{д.3.2} = 0,5$ мм: а - $\delta_{р.3.1} = \delta_{р.3.2} = 0,5$ мм; б - $\delta_{р.3.1} = \delta_{р.3.2} = 1,0$ мм; в - $\delta_{р.3.1} = \delta_{р.3.2} = 1,5$ мм (для Рис. 2, 3 — — - расчет; — • — - эксперимент)

эксперименте, при которых расчетные и экспериментальные значения КПД совпадают достаточно хорошо, можно сделать следующие выводы:

1. выполнен большой объем расчетно-теоретических, проектных и экспериментальных работ, направленных на проверку и совершенствование математических моделей расчета осевых турбин с точки зрения точности и надежности получаемых с их помощью результатов;
2. с учетом, проведенных исследований усовершенствованы математические модели расчета осевых турбин и оценки влияния на ее эффективность отдельных конструктивных элементов, что позволило расчетным путем с высокой степенью точности определять газодинамические характеристики и показатели эффективности существующих или вновь проектируемых проточных частей осевых турбин;
3. хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по влиянию на КПД модельного двухступенчатого отсека воздушной экспериментальной турбины конструктивных и режимных параметров (Рис. 2, 3) позволяет сделать вывод о возможности использования созданных математических моделей в задачах оптимального проектирования проточных частей осевых турбин в системах автоматизированного проектирования (САПР) турбомашин;
4. разработанные достоверные математические модели в сочетании с методами оптимального проектирования позволяют утверждать о возможности проектирования оптимальных отсеков, имеющих более высокое значение КПД. Окончательное подтверждение этому выводу может дать экспериментальная проверка вновь спроектированного с использованием апробированных математических моделей оптимального отсека и проведение сравнительного анализа его с приведенным в данной статье исходным вариантом.

Литература

1. Бойко А.В. Оптимальное проектирование проточной части осевых турбин. Харьков: Вища школа, 1982. – 150 с.
2. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин. – Харьков: «Вища школа», 1989. – 220 с.
3. Бойко А.В., Гаркуша А.В. Аэродинамика проточной части паровых и газовых турбин: расчеты, исследования, оптимизация, проектирование. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 360 с.
4. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П. Экспериментальный стенд для исследования воздушной двухступенчатой турбины. – Энергет. машиностроение, 1986. – Вып. 37. – С.
5. Гончаренко Л.В. Исследование турбинных ступеней с повышенной нагрузкой. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1979. – 205 с.

© Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П., 2005