

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»

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ОТСЕКА ВОЗДУШНОЙ ТУРБИНЫ

Виконана робота по експериментальному підтвердженню можливості використання розробленої методології і алгоритмів оптимального проектування складних технічних систем, базованих на багаторівневих ієрархічних алгоритмах при умові використання апробованих математичних моделей розрахунку осевої турбіни та її елементів. Спроековано оптимальний варіант двохступеневого відсіку повітряної турбіни, виготовлено, та проведено його експериментальне дослідження. Експериментально доведено високий рівень надійності та достовірності результатів отриманих з допомогою використаних під час проектування та розрахунків математичних моделей, та алгоритмів оптимального проектування складних технічних систем.

The job on experimental confirmation of utilization possibility of developed complex engineering systems optimal design method based on multilevel hierarchical algorithms in the case of reliable axial turbine and its elements mathematical models is carried out. The optimal version of two-stage axial air turbine section was designed, created and its experimental investigations were performed. The high level of reliability and authenticity of results obtained with the aid of design and calculation models as well as complex engineering systems design algorithms used was experimentally proved.

При проектировании оптимального варианта двухступенчатого отсека ставилась задача проверки возможности практического использования разработанной методики оптимизации проектных параметров осевых турбин и методов расчета проточной части [1-3], как подсистемы САПР «Турбоагрегат». Оптимальное проектирование двухступенчатого отсека осуществлялось посредством решения трех иерархически взаимосвязанных оптимизационных задач [4]:

1. Оптимизация распределения располагаемого теплоперепада отсека между его ступенями и выбор степеней реактивности последних.
2. Определение оптимальных значений степеней закрутки лопаточных венцов.
3. Оптимизация формы обводов профилей решеток.

При решении первой оптимизационной задачи в качестве целевой функции выступал максимум внутреннего КПД отсека, а второй – максимум внутреннего КПД каждой его ступени. Рассмотрим более подробно особенности и результаты решения этих задач.

Оптимизация распределения располагаемого теплоперепада и выбор степеней реактивности ступеней отсека.

В качестве параметра, характеризующего распределение располагаемого теплоперепада между ступенями, использовалось статическое давление рабочего тела за первой ступенью (P_{21}), а для оценки влияния углов. Таким образом, в число компонент вектора управляющих параметров первого уровня иерархической аппроксимационной схемы были включены следующие параметры:

$$Q_1 = \{R_1, R_2, P_{21}\},$$

где R_1 и R_2 – степени реактивности на среднем радиусе первой и второй ступени соответственно.

Поиск оптимальных параметров первого уровня осуществлялся в области факторного пространства, границы которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Границы поиска оптимальных параметров

Граница	R_1	R_2	P_{21} , кПа
Левая	0,1	0,1	122
Правая	0,35	0,35	132

Для выполнения условия сходимости потребовались три итерации, при этом использовался один из стандартных методов поиска оптимума для квадратичной функции отклика. Оптимальные значения факторов первого уровня и соответствующие им параметры двухступенчатого отсека на среднем радиусе приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры оптимального варианта отсека

Параметры	Ступень 1	Ступень 2
R	0,297	0,331
P_{21} , кПа	123,9	100,1
U/C_0	0,528	0,584
α_1	13,2	15,2
β_1	53,5	47,2
β_2	17,3	19,4
α_2	100,2	84,5

В связи с тем, что для ступеней оптимального варианта отсека характерны высокие степени реактивности, его КПД оказался значительно чувствительней к величине надбандажного радиального уплотнения.

Оптимизация закрутки венцов ступеней.

Для снижения этой чувствительности решалась задача оптимизации закрутки венцов ступеней, где в качестве начального приближения использовались параметры двухступенчатого отсека, полученные при решении предыдущей задачи. В число компонент вектора управляющих параметров \bar{Q}_1 были включены угол β_{2cp} , а также показатели степени закрутки венцов m_1 , m_2 .

$$\bar{Q}_1 = \{\beta_{2cp}, m_1, m_2\},$$

углы навала выходных кромок в обеих ступенях равнялись нулю. В результате решения оптимизационной задачи закрутки венцов были выровнены градиенты степеней реактивности обеих ступеней с существенным перераспределением расхода вдоль радиуса и изменением степеней реактивности ступеней на среднем радиусе, что позволило получить конструкцию отсека, характеризующийся достаточно высоким

уровнем КПД и приемлемой чувствительностью к величине надбандажного радиального уплотнения.

Оптимальные параметры двухступенчатого отсека приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры оптимального варианта отсека

Параметры	Ступень 1	Ступень 2
R	0,12	0,226
P_{21} , кПа	123,8	100,1
U/C_0	0,526	0,582
α_1	11,92	14,16
β_1	27,14	40,05
β_2	21,39	21,57
α_2	65,9	68,2

Оптимизация формы обводов профилей решеток отсека.

Результаты решения предыдущей задачи были использованы в качестве исходных данных при решении задач профилирования, которое осуществлялось по трем сечениям: корневому, среднему и периферийному. Оптимизация формы профилей осуществлялась по геометрическому критерию качества [2].

При создании профилей рабочих решеток спинка профиля описывалась полиномом седьмого порядка, а корытце – окружностью. Профили сопловых аппаратов создавались в два этапа. Вначале определялась форма обводов профильной части, а затем вручную достраивался вытеснитель. Спинка профильной части направляющих аппаратов описывалась полиномом шестого, а корытце – пятого порядков.

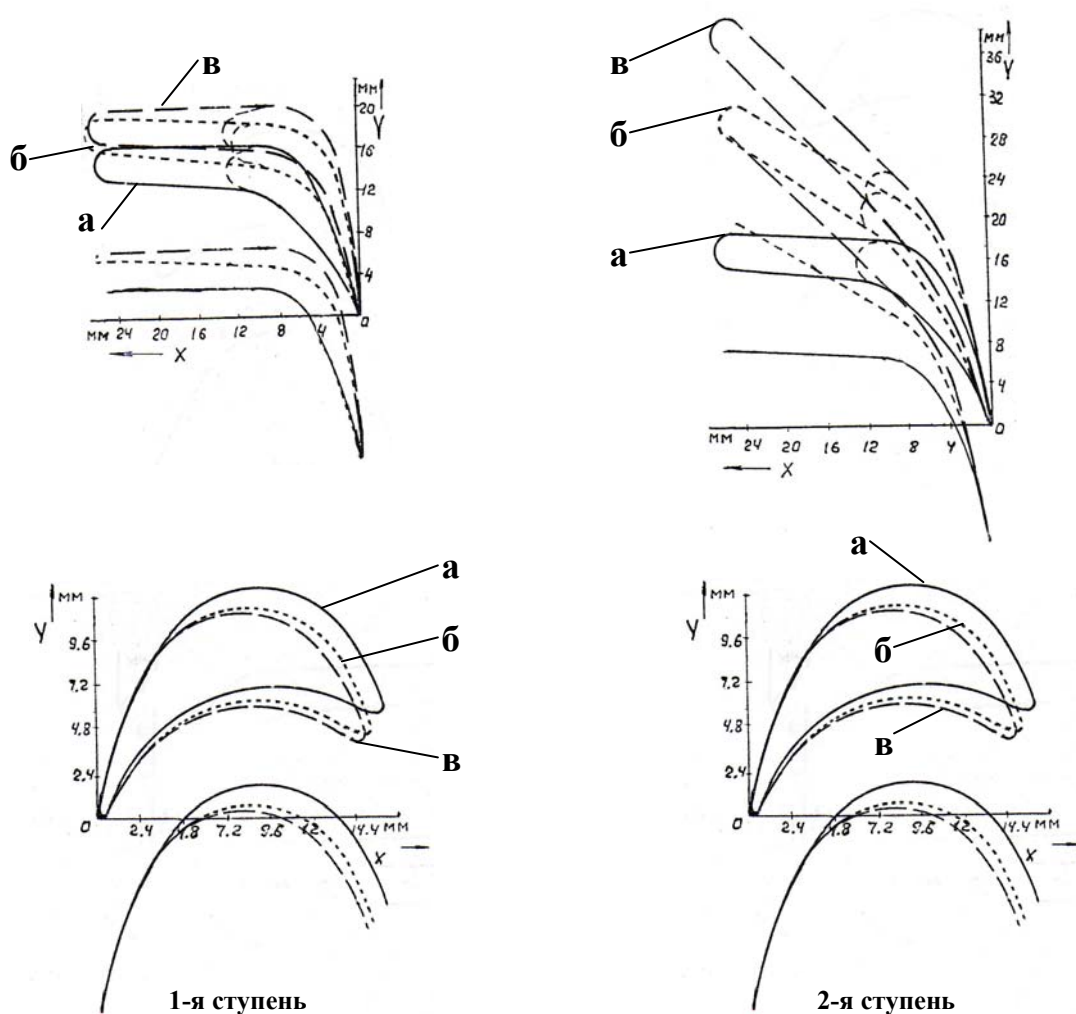
Характеристики профилей приведены в таблицах 4 и 5, а их обводы и формы каналов решеток показаны на рис. 1.

Таблица 4. Геометрические характеристики решеток направляющих аппаратов

Ступень	Длина лопатки	t , мм	b , мм	α_0 , град	α_1 , град	a_r
I	0	15,15	20,0	90,0	20,01	5,208
	$1/2\ell$	16,17	21,0	90,0	10,6	2,974
	ℓ	17,19	22,5	90,0	8,6	2,570
II	0	15,15	21,0	96,8	17,26	4,494
	$1/2\ell$	16,31	25,0	121,4	13,3	3,751
	ℓ	17,46	27,0	139,9	11,05	3,346

Таблица 5. Геометрические характеристики решеток рабочих колес

Ступень	Длина лопатки	t , мм	b , мм	β_1 , град	β_2 , град	a_r
I	0	10,73	16,5	39,3	21,5	4,441
	$1/2\ell$	11,48	14,8	25,8	22,8	4,441
	ℓ	12,24	14,6	24,0	24,0	4,978
II	0	10,73	17,0	40,0	20,0	3,591
	$1/2\ell$	11,59	16,0	36,0	21,3	4,208
	ℓ	12,44	15,6	35,97	22,6	4,729



а – периферийное сечение, б – среднее сечение, в – корневое сечение

Рис. 1. Форма профилей и каналов сопловых аппаратов и рабочих решеток ступеней оптимального отсека в трех сечениях

Сравнительные экспериментальные исследования исходного и оптимального вариантов отсеков.

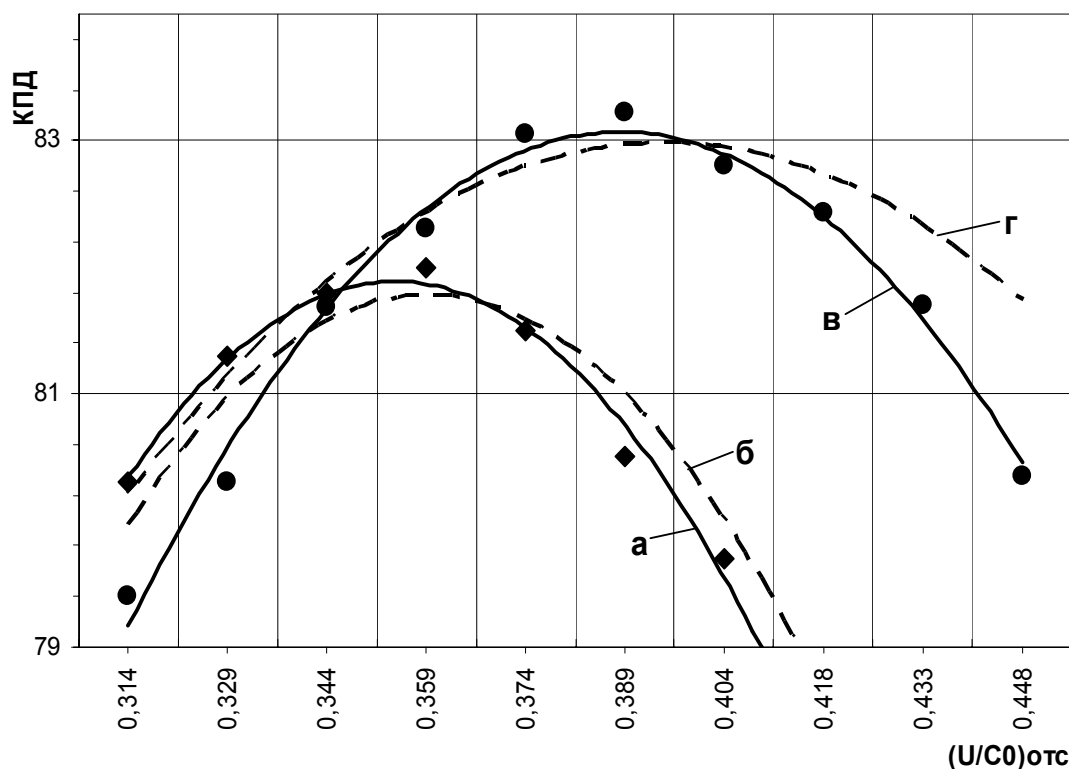
Целью исследования явилась проверка достоверности и надежности результатов, полученных расчетным путем с помощью разработанных математических моделей и методики оптимального проектирования многоступенчатой осевой турбины.

Опыты проводились при следующих параметрах воздуха: $P_0^* = 160 \text{ кПа}$, $T_0^* = 385 \text{ К}$, $P_2 = 100,1 \text{ кПа}$. Методика проведения эксперимента и обработки данных изложена в [5].

В результате экспериментальных исследований получены зависимости внутреннего относительного КПД отсеков от $(U/C_0)_{\text{отс}}$ при различных значениях

зазоров надбандажных ($\delta_{p.3.1} = \delta_{p.3.2} = (0,7; 0,9; 1,5)$ мм) и диафрагменного ($\delta_{д.3.2} (0,5; 1,0; 1,5)$ мм) уплотнений.

В качестве подтверждения обоснованности и надежности разработанных методов оптимального проектирования многоступенчатых осевых турбин на примере двухступенчатого отсека, на рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные зависимости КПД отсека от $(U/C_0)_{отс}$ для исходного и оптимального вариантов отсека. Диапазоны изменения $(U/C_0)_{отс} = 0,31 \div 0,47$, что позволяет достаточно четко определить максимальное значение КПД и оптимальное отношение $(U/C_0)_{отс}^{opt}$.



$\delta_{p.3.1} = \delta_{p.3.2} = 0,7$ мм, $\delta_{д.3.2} = 0,5$ мм.; а – исходный (эксперимент), б – исходный (расчет), в – оптимальный (эксперимент), г – оптимальный (расчет).

Рис. 2. Зависимости внутреннего КПД исходного и оптимального вариантов отсека от отношения скоростей $(U/C_0)_{отс}$

Сопоставление уровней КПД исходного и оптимального вариантов показывает, что КПД оптимального варианта отсека при $\delta_{p.3} = 0,7$ мм выше КПД исходного варианта на 1,1%, кроме того, из рисунка видно, что зависимости КПД от $(U/C_0)_{отс}$ оптимального варианта носят более пологий характер по сравнению с зависимостями для исходного варианта, т.е. решетки оптимального варианта отсека оказались более устойчивы к углу натекания потока. Необходимо также отметить, что значение $(U/C_0)_{отс}$, при котором достигается максимум КПД оптимального варианта отсека совпадает с проектным уровнем этого параметра $(U/C_0)_{отс} = 0,396$.

Выполненный объем расчетных и экспериментальных исследований по определению оптимальных проектных параметров многоступенчатых осевых турбин позволяет сделать следующие выводы:

1. Дальнейшее повышение экономичности проточных частей турбомашин должно основываться на методах оптимального выбора геометрических и газодинамических параметров с учетом диссипации кинетической энергии в венцах, утечек в диафрагменные и надбандажные зазоры, потерь от влажности, трения дисков, бандажей и других факторов, оказывающих влияние на экономические показатели многоступенчатой проточной части.

2. Решение задач оптимального проектирования осевых турбин в условиях САПР выдвигает повышенные требования надежности, точности, адекватности, экономичности и др. к используемым математическим моделям.

3. Разработан алгоритм многоуровневой оптимизации, позволяющий представить задачу оптимального проектирования турбоагрегата в виде иерархически взаимосвязанных подзадач: оптимизации параметров тепловой схемы – цилиндра – отсека – ступени – элемента ступени.

4. Проведены сравнительные экспериментальные исследования исходного и оптимального вариантов двухступенчатого отсека. Анализ опытных и расчетных данных показывает, что:

– уровень КПД оптимального варианта двухступенчатого отсека выше КПД исходного варианта, при штатных моделируемых зазорах, на 1,1 %;

– наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей КПД отсеков по характеру изменения и по его абсолютному уровню.

5. Вышеизложенное подтверждает адекватность разработанных математических моделей и эффективность методики многоуровневой оптимизации проектных параметров проточной части осевой турбины, что позволяет рекомендовать их к использованию в качестве подсистемы оптимального проектирования САПР «Турбоагрегат».

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. *Усатый А.П.* Оптимизация ЦВД мощных паровых турбин. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1988. – 175 с.

5. *Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П.* Экспериментальный стенд для исследования воздушной двухступенчатой турбины // Энергет. Машиностроение. – 1986. – Вып. 37.

© Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П., 2006