

УДК 621.165

А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПИ»;
Д. И. МАКСЮТА, аспирант НТУ «ХПИ»

МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ С УЧЕТОМ ОБТЕКАНИЯ ТУРБИННЫХ ПРОФИЛЕЙ И ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПРОТЕЧКИ

В работе приведен метод оптимизации ступеней осевой турбины с учетом обтекания турбинных профилей и периферийной протечки. Выполнены трехмерные расчеты исследуемой ступени. Проведено два этапа оптимизация по критерию повышения КПД. Расчетным путем повышен КПД изолированной ступени на 0,48 %. Получены интегральные и локальные по высоте характеристики потока. Сделан анализ полученных результатов. Представлены выводы относительно целесообразности применения данного метода при оптимизации турбин.

Ключевые слова: пространственное профилирование, разработка методики оптимизации, изолированная турбинная ступень, закон закрутки, периферийная протечка.

Введение

Оптимизация турбин всегда представляла большой интерес для энергетической отрасли и экономики страны в целом. Учитывая большое количество часов работы турбины в году и её достаточно большой остаточный ресурс, даже небольшое повышение эффективности турбины дает значительный экономический эффект [1].

Существенные резервы в повышении эффективности турбоагрегатов находятся в усовершенствовании проточной части мощных паровых турбин. В настоящее время, одним из перспективных направлений по усовершенствованию проточных частей турбин является использование вычислительной аэродинамики (*CFD*) в алгоритмах оптимизации [1]. При этом, необходимо учитывать, что утечки рабочего тела в периферийный зазор имеют значительное влияние на течение в турбинном канале.

В данной статье представлены результаты разработки метода пространственной оптимизации ступени с учетом характера обтекания турбинных профилей и утечек в надбандажное отверстие.

Постановка задачи

Объект исследования: турбинная ступень, в направляющей решетке которой использован профиль ТС-1А, а в рабочей – профиль активного типа Р2. Межвенцовый зазор, надбандажное пространство и выхлопной патрубков формировался отдельным доменом – *ZAZOR*. Общий вид расчетной области представлен на рис. 1.

Граничные условия: $P_1^* = 145500$ Па, $T_1^* = 387$ °К, $P_2 = 100300$ Па, рабочее тело – воздух. Указанным граничным условиям соответствует дозвуковое истечение во всей ступени (числа Маха не превышают $M = 0,78$). Плоскость замера параметров в расчетах располагалась: в межвенцовом зазоре – за доменом направляющих решеток; в выхлопном патрубке – на расстоянии 16 мм от выходной кромки рабочей решетки.

Для данной исходной ступени была проведена верификация её численного расчета, которая показала хорошее совпадение результатов численного расчета и натурального эксперимента [2].

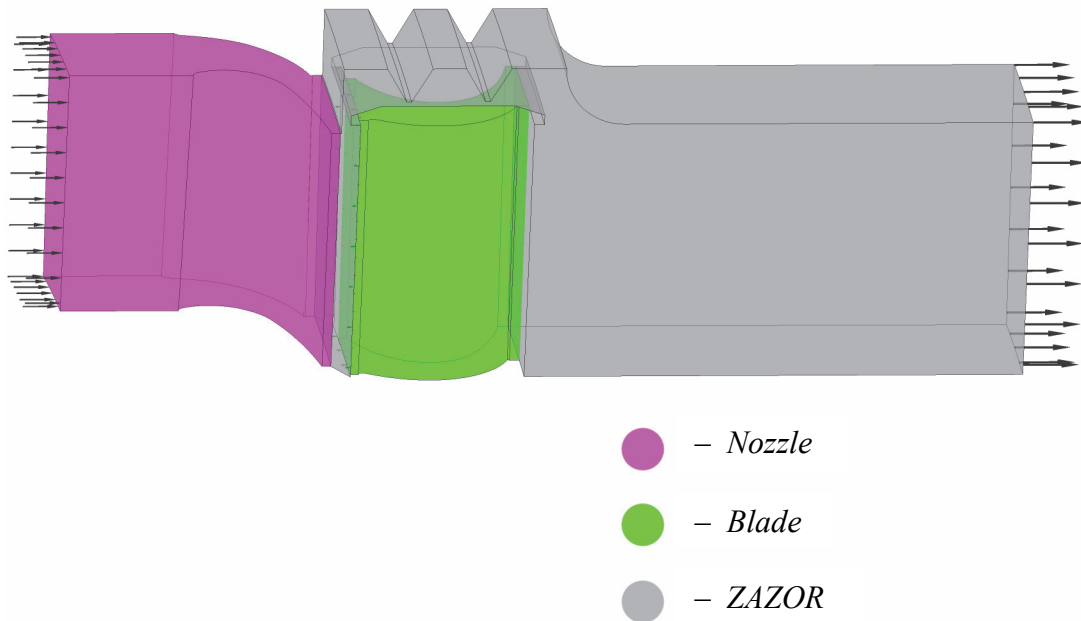


Рис. 1 – Общий вид расчетной области

Параметры исходной ступени указаны в таблице 1.

Таблица 1

Параметры исходной ступени

Параметр	Направляющий аппарат	Рабочее колесо
Ср. диаметр (d_{cp})	353 мм	353 мм
Хорда (b)	21,83 мм	16 мм
Угол установки (β_y)	55,1806°	13,17°
Отн. шаг (t/b)	0,747	0,722
Отн. длина (l/b)	1,145	1,69
Число лопаток (z)	68	96
Высота лопаток (l)	25 мм	27 мм
Обороты ротора (n)	8145 об/мин	
Межвенцовый зазор	4 мм	
Радиальный зазор	0,5 мм	

Для получения данных о вязком течении в турбинной решетке численно решалась система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, расчетная схема TVD второго порядка аппроксимации с локально первым в местах высоких градиентов. Все расчеты проводились в трехмерной постановке. Расчетная сетка для сопла составила $180 \times 98 \times 90$ элементов, для рабочей решетки $120 \times 98 \times 90$ элементов. Домен ZAZOR в общей сложности состоял из 2,2 млн. элементов. Модель турбулентности – $k-\omega$ SST.

Цель исследования – создание метода оптимизации ступени осевой турбины, а так же качественный и количественный анализ результатов оптимизации.

Варьируемые параметры – законы закрутки направляющего и рабочего профилей.

Оптимизационный подход – теория планирования эксперимента с уточненной формальной макромоделью [3] и ЛП_т – поиск экстремума.

Расчетное исследование

Для варьирования законами закрутки лопаточных венцов предлагается применить зависимости:

$$r_1^{m_1} \operatorname{ctg} \alpha_y = \operatorname{const}; \quad r_2^{m_2} \operatorname{ctg} \beta_y = \operatorname{const}, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 – радиусы направляющей и рабочей решеток соответственно; α_y и β_y – углы установки направляющей и рабочей решетки на данном радиусе; m_1 и m_2 – варьируемые параметры направляющей и рабочей решеток соответственно.

Параметры m_1 и m_2 характеризуют градиенты углов закрутки. При $m > 0$ получаются возрастающие к периферии углы (прямая закрутка), а при $m < 0$ – уменьшающиеся (обратная закрутка) [4].

Зная углы установки профиля, легко определить углы выхода потока.

По результатам расчетов была получена оптимальная ступень со значениями $m_1 = 0,53772$ и $m_2 = 2,1698$. Точность формальной макромоделли при этом составила 0,005 %. Интегральные характеристики течения в исходной и оптимальной ступени сведены в таблице 2.

Таблица 2

Интегральные характеристики работы исходной и оптимальной ступени

Параметр	Исходная	Оптимальная
КПД	85,05 %	85,34 %
Потери в сопле	3,30 %	3,23 %
Потери в лопатке	7,46 %	7,51 %
Потери с вых. скоростью	5,17 %	4,98 %
Расход	1,68021 кг/с	1,69344 кг/с

Таким образом, в результате оптимизации была получена ступень с КПД на 0,29 % выше, чем у исходной. Однако, в ходе проведения расчетов было обнаружено, что во всех расчетных вариантах (включая оптимальный) натекание потока на рабочую решетку происходит с ударом (рис. 2). Избежать удара и улучшить обтекание возможно с помощью корректировки угла установки рабочего профиля. Но в этом случае изменение геометрических параметров обязательно повлечет за собой изменение таких величин как расход и угол выхода потока из ступени. Поэтому, было предложено изменять геометрический входной угол профиля рабочей лопатки с последующим перепрофилированием [5]. Этот прием обеспечивая безударное натекание на рабочий профиль, не вызывает значительных изменений в исходных (расход) и выходных из ступени характеристиках потока.



Рис. 2 – Натекание потока на рабочую решетку на среднем радиусе после первого этапа оптимизации

Ступень с безударным натеканием на рабочую лопатку не всегда представляет собой самый лучший вариант с точки зрения минимума потерь. Поэтому, в задаче оптимизации к варьируемым параметрам была добавлена величина изменения геометрического входного угла профиля рабочей лопатки ($\Delta\beta_r$), что позволило в задаче оптимизации получать углы натекания потока, обеспечивающие минимальные профильные потери рабочей решетки.

Таким образом, полный список варьируемых параметров состоит из трех составляющих: законы закрутки направляющего и рабочего профилей, величина корректировки входного геометрического угла рабочей решетки ($\Delta\beta_r$) постоянная по всей высоте лопатки.

Диапазоны варьирования были выбраны на основании предшествующих оптимизации исследований. Их значения сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Диапазоны варьирования переменных

Параметр	Направляющая решетка	Рабочая решетка
m_1	-1...2	X
m_2	X	-1...4
$\Delta\beta_r$	X	0...12

Порядок проведения численного эксперимента:

- 1) Определяются диапазоны варьирования.
- 2) Составляется план эксперимента.
- 3) Рассчитываются для исходной ступени на среднем радиусе по формулам (1) константы в законах закрутки.
- 4) Вычисляются углы установки направляющего и рабочего профилей по высоте по зависимостям, вытекающим из (1):

$$\alpha_y = \arctg\left(\frac{r_1^{m_1}}{\text{const}}\right); \quad \beta_y = \arctg\left(\frac{r_2^{m_2}}{\text{const}}\right). \quad (2)$$

- 5) Изменяются геометрические входные углы рабочей решетки на величину $\Delta\beta_r$.

- 6) Строятся новые профили.
- 7) Выполняется расчет ступени.

После второго этапа эксперимента была получена ступень со значением варьируемых параметров: $m_1 = 0,94014$, $m_2 = 1,550125$, $\Delta\beta_r = 7,653259^\circ$. Полученные профили рабочей лопатки в корневом, среднем и периферийном сечениях показаны на рис. 3–5.

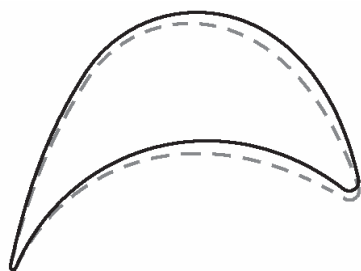


Рис. 3 – Корневе сечение исходного (—) и измененного (- - -) профиля решетки

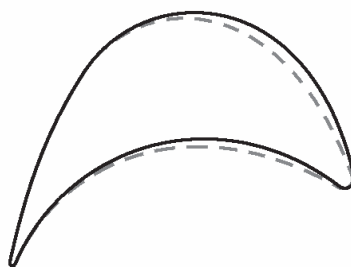


Рис. 4 – Среднее сечение исходного (—) и измененного (- - -) профиля решетки

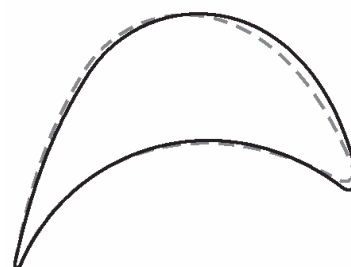


Рис. 5 – Периферийное сечение исходного (—) и измененного (- - -) профиля решетки

Точность формальной макромодели составила 0,04 %. Интегральные характеристики потока представлены в таблице 4.

Как видно, уточненная методика оптимизации оказалась лучше. КПД новой ступени на 0,48 % выше, чем у исходной. Заметно уменьшились потери на рабочих лопатках и на некоторую величину потери с выходной скоростью.

Таблица 4

Интегральные характеристики потока исходной и двух оптимальных ступеней

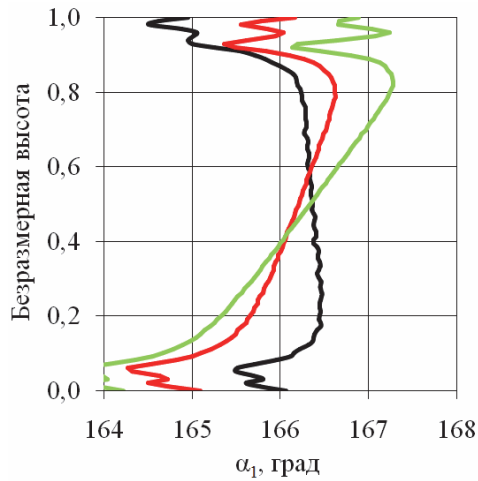
Параметр	Исходная	Оптимальная #1	Оптимальная #2
КПД	85,05 %	85,34 %	85,53 %
Потери в сопле	3,30 %	3,23 %	3,38 %
Потери в лопатке	7,46 %	7,51 %	6,92 %
Потери с вых. скоростью	5,17 %	4,98 %	5,05 %
Расход	1,68021 кг/с	1,69344 кг/с	1,69214 кг/с

Для более емкого анализа причин увеличения КПД ступени были получены локальные характеристики по высоте ступени (рис. 6–11).

Из рис. 6 видно, что угол выхода потока из направляющей решетки сильно изменился. Однако, такое изменение α_1 в совокупности с изменением β_y привело к значительному перераспределению угла натекания потока на рабочую решетку. Как видно из рис. 4, угол β_1 стал более равномерным по всей высоте рабочей решетки. Следствием этого явилась нормализация по высоте угла атаки на рабочую решетку (рис. 10). Кроме того, благодаря варьированию величины $\Delta\beta_r$ был найден оптимальный угол натекания на рабочую решетку. Этот вывод подтверждается построенными полями скоростей вокруг профиля рабочей решетки (рис. 2, рис. 11).

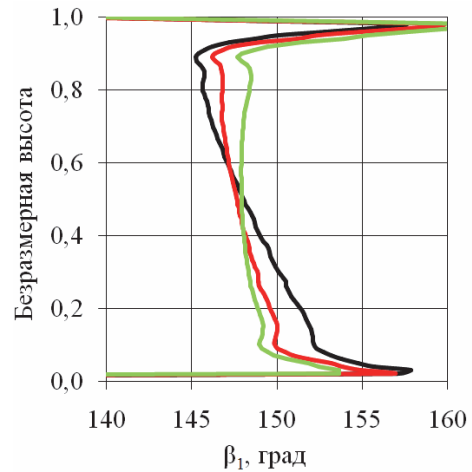
Степень реактивности ступени у исходного и наилучшего оптимального варианта практически не изменилась на среднем радиусе (рис. 9). Однако, у оптимального варианта мы имеем несколько выровненный градиент давления ступени реактивности по высоте, что привело к некоторому уменьшению протечек через радиальный зазор ступени (0,17 %).

Следует, также, отметить, что сделанное ранее предположение об уместности изменения геометрического угла натекания рабочей решетки вместо угла её установки подтвердилось. Как видно из графиков, угол выхода потока из рабочей решетки существенно не изменился (рис. 8).



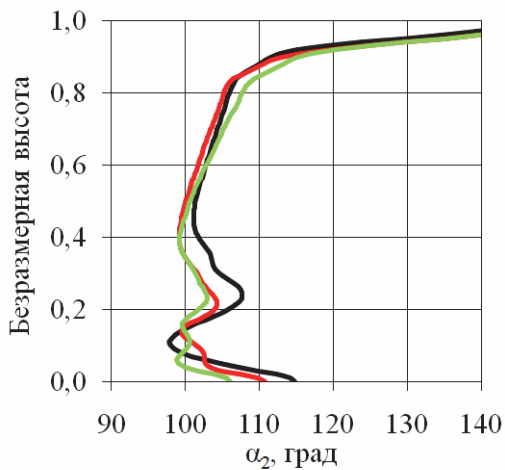
— α_1 исх — α_1 опт1 — α_1 опт2

Рис. 6 – Распределение по высоте абсолютного угла выхода потока из направляющей решетки



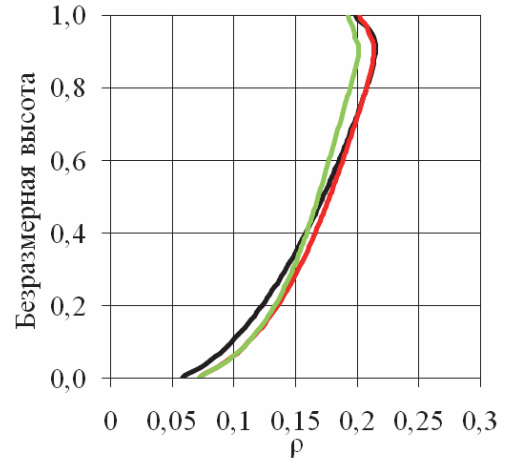
— β_1 исх — β_1 опт1 — β_1 опт2

Рис. 7 – Распределение по высоте относительного угла натекания потока на рабочую решетку



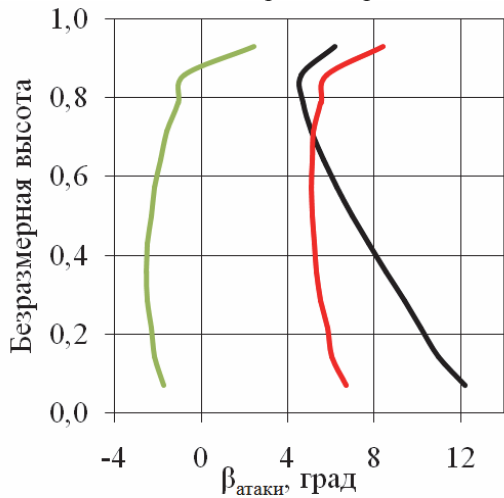
— α_2 исх — α_2 опт1 — α_2 опт2

Рис. 8 – Распределение по высоте абсолютного угла выхода потока из рабочей решетки



— ρ исх — ρ опт1 — ρ опт2

Рис. 9 – Распределение по высоте степени реактивности в ступени



— $\beta_{ат}$ опт2 — $\beta_{ат}$ исх — $\beta_{ат}$ опт1

Рис. 10 – Распределение по высоте угла атаки потока на рабочей решетке

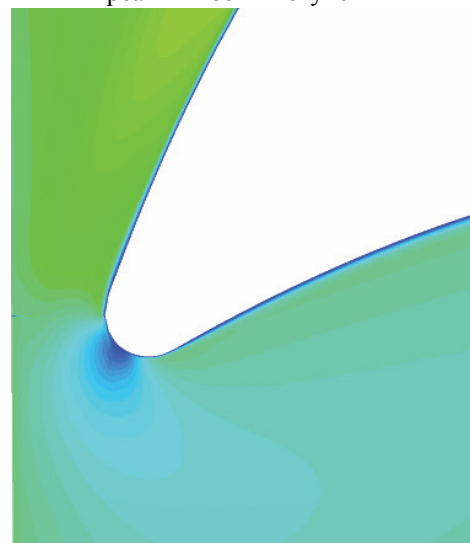


Рис. 11 – Натекание потока на рабочую решетку на среднем радиусе после второго этапа оптимизации

Не маловажною особенностью даних исследований является то, что интегральные и распределенные по высоте ступени характеристики хорошо согласуются между собой. В частности, из табл. 4 можно заключить, что повышение КПД оптимизированной ступени произошло в большей степени из-за снижения потерь на рабочей решетке и незначительно потерь с выходной скоростью. Полученные локальные характеристики течения в ступени подтвердили тот факт, что потери на рабочем колесе уменьшились за счет уменьшения удара потока при натекании и, как следствие, уменьшения пограничного слоя с более благоприятным обтеканием лопатки в целом.

Выводы

1) Предложен метод пространственной оптимизации турбинной ступени, позволяющий в процессе оптимизации учесть характер течения рабочего тела в решетках ступени и влияние на него протечек в радиальный зазор.

2) Получена оптимальная ступень, КПД которой выше исходной на 0,48 %.

Список литературы: 1. Бурлака, М. В. Аэродинамическая оптимизация направляющих решеток осевых турбин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.16: защищ. 27.01.2011 / Бурлака Максим Васильевич. – Х., 2011. – 167 с. 2. Верификация численного расчета работы ступени осевой турбины с учетом периферийной протечки [Текст] / А. В. Бойко, Д. И. Максютя // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 13(987). – С. 18–23. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2078-774X. 3. Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента [Текст] / А. В. Бойко, А. П. Усатый, В. С. Баранник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 5–9. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. 4. Бойко, А. В. Аеродинаміка проточної частини парових та газових турбін: розрахунки, дослідження, оптимізація, проектування [Текст]: моногр. / А. В. Бойко, А. В. Гаркуша. – Х.: ХДПУ, 1999. – Рос. мовою. – С. 142–143. – ISBN 966-593-058-3. 5. Бойко, А. В. Численный расчет влияния удара на рабочую лопатку при работе в ступени [Текст] / А. В. Бойко, М. В. Бурлака, Д. И. Максютя // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 7. – С. 24–28. – ISSN 2078-774X.

Bibliography (transliterated): 1. Burlaka, M. V. *Ajerodinamicheskaja optimizacija napravljajushhih reshetok osevyh turbin. Dis. ... kand. tehn. nauk.* Kharkov, 2011. Print. 2. Bojko, A. V., and D. I. Maksjuta. "Verifikacija chislennoho rascheta raboty stupeni osevoj turbiny s uchetom periferijnoj protechki." *Visnyk NTU "HPI". Serija: Energetychni ta teplotehnychni procesy j ustatkuvannja.* No. 13(987). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 18–23. ISSN 2078-774X. Print. 3. Bojko, A. V., A. P. Usatyj and V. S. Barannik. "Povyshenie tochnosti formal'noj makromodeli pri planirovanii jeksperimenta." *Visnyk NTU "HPI". Serija: Energetychni ta teplotehnychni procesy j ustatkuvannja.* No. 12(986). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 5–9. ISSN 2078-774X. Print. 4. Bojko, A. V., and A. V. Garkusha. *Aerodynamika protochnoi' chastyny parovyh ta gazovyh turbin: rozrahunky, doslidzhennja, optyimizacija, proektuvannja.* Kharkov: HDPU, 1999. ISBN 966-593-058-3. Print. 5. Bojko, A. V., M. V. Burlaka and D. I. Maksjuta. "Chislennyj raschet vlijanija udara na rabochuju lopatku pri rabote v stupeni" *Energetychni ta teplotehnychni procesy j ustatkuvannja. Visnyk NTU "HPI".* No. 7. Kharkiv: NTU "HPI", 2012. 24–28. ISSN 2078-774X. Print.

Поступила (received) 13.02.2014