

УДК 621.165

**А. В. БОЙКО**, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПИ»;  
**Ю. Н. ГОВОРУЩЕНКО**, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ»;  
**В. С. БАРАННИК**, аспірант НТУ «ХПИ»

### **ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СОХРАНЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ РЕШЕТКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Выполнена пространственная оптимизация стандартного профиля турбинной решетки с учетом ограничений на расход рабочего тела и прочность профиля. Показана возможность повышения аэродинамической эффективности рассмотренного турбинного профиля. Проведено сравнение полученных результатов с более ранними исследованиями. Помимо этого, для более детального анализа результатов приведены графики распределения потерь по высоте турбинной лопатки. Также, рассмотрен метод построения турбинных профилей с помощью кривых Безье.

**Ключевые слова:** пространственная оптимизация, турбинная лопатка, функциональные ограничения, исходная форма лопатки, оптимальная форма лопатки, интегральные потери, кривая Безье.

#### **Введение**

Постановка задачи оптимального проектирования турбинных ступеней подразумевает повышение эффективности данной ступени при учете ряда противоречивых ограничений. Наиболее важными среди них являются прочностные ограничения и ограничения на расход рабочего тела через решетку. Ранее данному вопросу было посвящено большое количество исследований, которые показали возможность повышения аэродинамической эффективности направляющего аппарата при соблюдении выше упомянутых ограничений [1–3]. Однако, проводя анализ полученных результатов, было замечено, что соблюдение пропускной способности решетки в данных постановках приводит к значительному отличию эффективности полученного оптимального варианта от варианта без ограничений, и, как следствие, не позволяет получать существенный выигрыш при оптимизации. Исходя из этого, возникает вопрос об изменении постановки задачи (а именно, способа соблюдения ограничений, который позволил бы получать минимальные отклонения КПД оптимальных решеток с учетом ограничений и без них). Данная статья посвящена одному из способов сохранения пропускной способности решеток с оптимальными профилями и анализу его положительных и отрицательных сторон.

#### **Постановка задачи**

В работе [2] показано, что оптимизация геометрических параметров профиля позволяет получить форму профиля с эффективностью выше исходного варианта. При этом особенностью используемой параметрической модели является сохранение шага и горла решетки при любом сочетании варьируемых параметров. Повышение эффективности решетки, естественно, приводит к изменению расхода рабочего тела, проходящего через неё. Следовательно, расход через решетку есть функция варьируемых геометрических параметров:  $\alpha_y$  – угол установки профиля,  $\alpha_{1r}$  – геометрический угол выхода потока,  $\delta$  – угол отгиба выходной кромки,  $\omega_0$  – угол заострения входной кромки,  $\omega_1$  – угол заострения выходной кромки. В данной постановке выигрыш от оптимизации составил 1,5 % в относительных величинах. Безусловно, представляет интерес оптимизация профиля турбинной решетки с

---

© А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, В.С. Баранник, 2014

ограничением на расход рабочего тела, что можно осуществить различными способами.

Изменение пропускной способности решеток в турбиностроении можно осуществить:

– варьированием горла  $a_r$ . Данный подход может быть осуществим как с помощью изменения угла установки профиля  $\alpha_y$  так и шага решетки  $t$ ;

– варьированием высоты лопатки  $l$ .

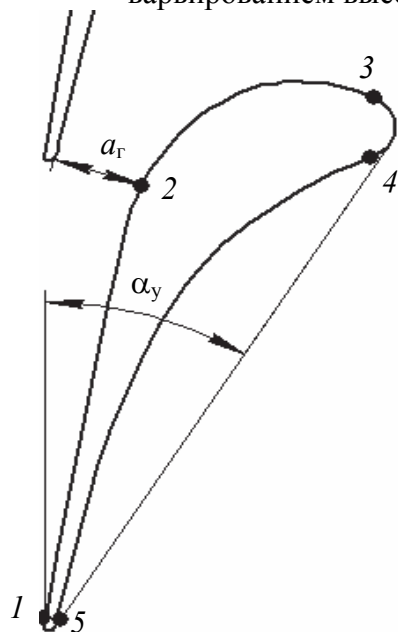


Рис. 1 – Параметрическая модель профиля

В данной статье рассматривается подход, при котором ограничение на расход осуществлялся с помощью изменения угла установки  $\alpha_y$  (рис. 1).

Объект исследования – прямая турбинная решетка. Основные геометрические параметры данной решетки, параметры потока на входе и выходе из решетки и схема задания граничных условий на поверхностях расчетной области соответствуют работе [2].

Оптимизация выбранного нами профиля направляющей решетки ТС-1А проводилась в два этапа:

1) Поиск оптимального профиля с функцией цели минимум интегральных потерь. При этом прочностные ограничения выдерживались путем сохранения площади поперечного сечения профиля.

2) Сохранение заданного расхода рабочего тела, путем варьирования угла установки полученного оптимального варианта.

Построение формы профилей и пера лопатки выполнено в программе *TopGrid*, в которой также осуществлено построение расчетных сеток и их экспорт во внешние *CFD* решатели. Оптимальное решение находилось с помощью теории планирования эксперимента по алгоритму, приведенному в работе [3] и ЛП<sub>т</sub> – поиска. Все расчеты проводились в трехмерной постановке.

#### Построение турбинного профиля

При разработке метода оптимизации формы профиля турбинной решетки необходимо учитывать тот факт, что выбор базовой кривой имеет большое значение, так как определяет надежность и наглядность решения поставленной задачи – получить наиболее эффективный профиль при заданных ограничениях. Наиболее распространенными среди кривых, используемых для построения профиля, являются дуги окружностей, лемнискаты, степенные полиномы, кривые Безье и т.д.

Анализируя работы, посвященные различным методам построения профилей турбинных решеток, профиль будем составлять из двух окружностей, описывающих входную и выходную кромку и трех кривых Безье, две из которых описывают сторону разрежения от входной кромки до горла решетки 1–2 и от горла до входной кромки 2–3, третья кривая Безье описывает сторону давления 4–5 (см. рис. 1).

Данный метод построения профилей довольно прост и позволяет оперировать привычными для проектировщика параметрами профиля.

Как известно, кривая Безье опирается на полигон из двух отрезков, проходящих через заданные точки. Возьмем для рассмотрения построение стороны давления

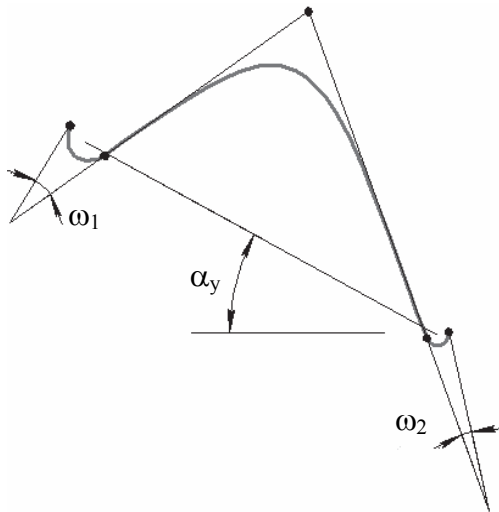


Рис. 2 – Кривая Безье, опирающаяся на полигон из двух отрезков

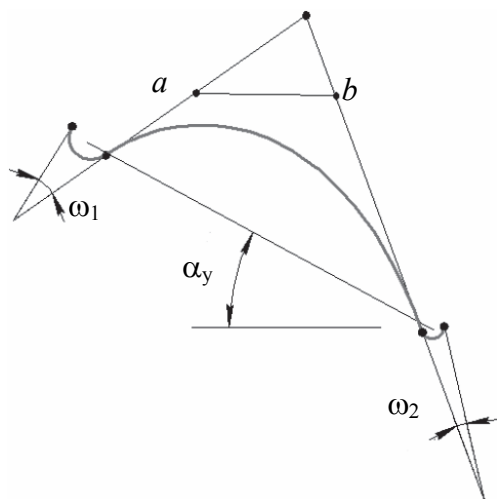


Рис. 3 – Кривая Безье, опирающаяся на полигон из трех отрезков

профиля. В этом случае отрезки, на которые опирается кривая, будут определяться углами заострения входной и выходной кромки. Очевидно, что в такой постановке получаемые кривые Безье будут обладать достаточно большой кривизной (рис. 2).

Для устранения данного недостатка требуется добавить еще один отрезок, пересекающий первые два (рис. 3). Однако, в данном случае необходимо отыскивать оптимальное расположение точек пересечения отрезков. Для решения этой задачи используют подход предложенный на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ». Метод минимума максимальной кривизны (ММК) основан на разбиении полученной кривой на ряд участков, на каждом из которых решается уравнение кривизны, после чего производится поиск минимальной кривизны. На основании полученных результатов выполняется поиск оптимального расположения точек  $a$  и  $b$  пересечения отрезков.

Стоит заметить, что отыскание оптимальных положений точек является достаточно затруднительным. Однако данную процедуру необходимо провести всего один раз для различных сочетаний углов и затабулировать, поскольку оптимальные кривые не зависят ни от ориентации, ни от размеров полигона. Затем в нужный момент необходимо просто взять положение точек из таблицы.

В процессе построения профиля турбинной решетки может возникнуть явление

самопересечения кривой и поэтому, для исключения данного эффекта, положение точек будет варьироваться от 0 до 1.

Построение остальных кривых Безье осуществляется по тому же принципу, с отличием только в точках, определяющих опорный полигон.

### Результаты оптимизации

Как уже было сказано выше, оптимизация профиля проводилась по тем же геометрическим параметрам и с соблюдением аналогичных работе [2] ограничениям. Однако в данной постановке использовалось поэтапное сохранение наложенных ограничений.

Заметим, что для получения оптимальной формы профиля с ограничением на прочностные характеристики при соблюдении требуемой точности формальной макромодели потребовалось такое же количество приближений, что и в работе [2]. При этом не учитывалось изменение расхода рабочего тела. Для его корректировки потребовалось произвести еще несколько расчетов при различных углах установки профиля, что связано с увеличением расчетного времени, затрачиваемого на процесс

пространственной оптимизации. Как показали результаты исследований, такой подход был оправданным.

Сравнение результатов оптимизации в рассмотренной поэтапной постановке проведено с исходным вариантом и с оптимальным вариантом, полученным в работе [2] (табл. 1).

Как видно из таблицы, в результате оптимизации профиля в новой постановке аэродинамическая эффективность относительно исходного варианта была повышена на 3 % в относительных величинах, что в два раза превышает выигрыш при одновременном соблюдении ограничений.

Для более точного анализа, полученных результатов, рассмотрим график распределения потерь по высоте лопатки (рис. 4). В работе [2] было отмечено, что оптимизация с одновременным соблюдением ограничений на площадь и расход рабочего тела показала некоторое уменьшение профильных потерь в ядре потока, при этом потери от вторичных течений остались на том же уровне. Из рис. 4 видно, что обтекание потоком полученного профиля является более благоприятным, так как позволяет уменьшить потери не только в ядре потока, но и в области вторичных течений.

Таблица

Результаты оптимизации

Лопатка	Исходный вариант	Оптимальный вариант	
		с одновременным соблюдением ограничений	с поэтапным соблюдением ограничений
Интегральные потери $\xi_{\text{инт}}$ , %	2,843030	2,799760	2,761250
Расход $G$ , кг/с	2,052510	2,051290	2,052380
Площадь $F$ , м <sup>2</sup>	0,000322	0,000349	0,000363

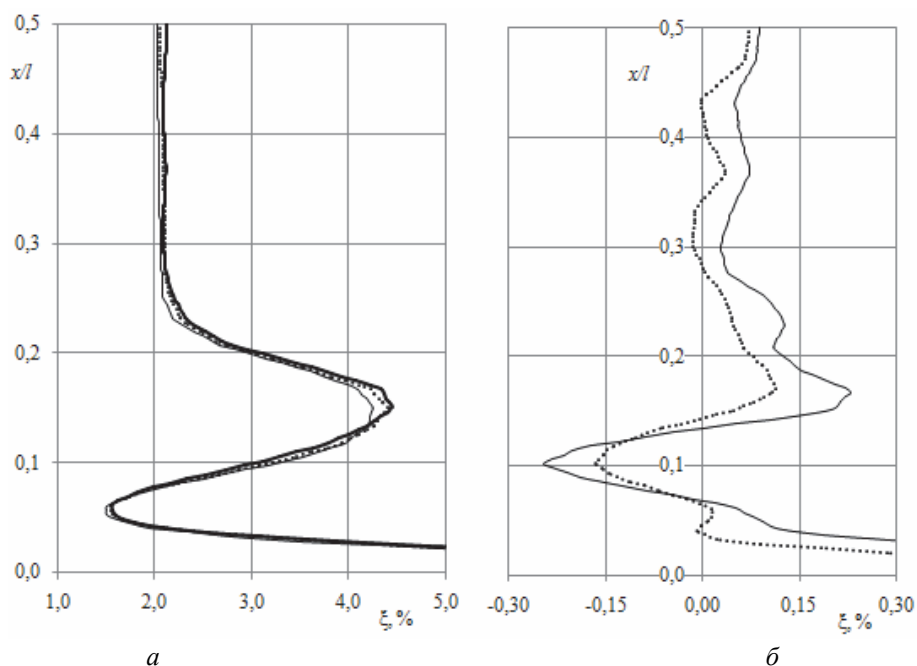


Рис. 4 – Распределение потерь  $a$  и их отклонение от исходного варианта  $b$  по высоте лопатки: ———— – исходный профиль; - - - - - – оптимальный вариант с поэтапным сохранением ограничений; ..... – оптимальный вариант с одновременным сохранением ограничений

Анализируя выше сказанное можно сделать следующие **выводы**:

1) Выбор метода сохранения пропускной способности решетки, заметно влияет на результаты оптимизации.

2) Оптимизация стандартного профиля в принятой постановке позволила получить профиль с интегральными потерями ниже исходного варианта на 3 % в относительных величинах. При этом потери были снижены как в ядре потока, так и в приторцевых областях.

3) Для более детального анализа полученных результатов и выработки рекомендаций по выбору способа сохранения расхода рабочего тела через решетку необходимо провести оптимизацию турбинного профиля в других постановках.

**Список литературы:** 1. Пространственная оптимизация лопатки прямой турбинной решетки с изменением профиля по высоте [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, В. С. Баранник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 5–10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. 2. Бойко, А. В. Пространственная оптимизация профиля лопатки прямой турбинной решетки [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, М. В. Бурлака, В. С. Баранник // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 6–10. – ISSN 2078-774X. 3. Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента // 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. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко и др. – Х.: НТУ «ХПІ», 2002. – С. 245–250. – ISBN 966-593-2284. 5. Щегляев, А. В. Паровые турбины [Текст]: учеб. для вузов / А. В. Щегляев. – М.: Энергия, 1976. – 368 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bojko, A. V., Ju. N. Govorushhenko and V. S. Barannik. "Prostranstvennaja optimizacija lopatki prjamoj turbinnoj reshetki s izmeneniem profilja po vysote." *Visnyk NTU "HPI". Serija: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustakuvannja*. No. 14(988). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 5–10. ISSN 2078-774X. Print. 2. Bojko, A. V., et al. "Prostranstvennaja optimizacija profilja lopatki prjamoj turbinnoj reshetki." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustakuvannja. Visnyk NTU "HPI"*. No. 8. Kharkiv: NTU "HPI", 2012. 6–10. 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 teplotehnichni procesy j ustakuvannja*. No. 12(986). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. С. 5–9. ISSN 2078-774X. Print. 4. Bojko, A. V., et al. *Ajerodinamicheskij raschet i optimal'noe proektirovanie protochnoj chasti turbomashin*. Kharkiv: NTU "HPI", 2002. ISBN 966-593-2284. Print. 5. Shhegljaev, A. V. *Parovye turbiny*. – Moskov: Jenergija, 1976. Print.

*Поступила (received) 11.02.2014*