

УДК 621.165

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

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОЖНОГО ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НАВАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ РЕАКТИВНОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКИ

Розглянута задача оптимізації складного тангенціального навалу кільцевої турбінної решітки реактивного типу. Викладена методика її рішення з використанням *CFD*-моделювання та планування чисельного експерименту. Приведено порівняння розрахункових характеристик оригінальної та модернізованої решіток.

The problem of optimization complex tangential bulk a blade rim of jet type is considered. The technique of its decision with use of *CFD*-modelling and planning of computing experiment is stated. Comparison of settlement characteristics of the initial and modernized blade rim is resulted.

Введение

С развитием вычислительной аэродинамики (*CFD*) появилась возможность более глубокого расчетного анализа потерь в пространственных решетках профилей и оптимизации их формы. Обзор современного состояния теории и практики проектирования проточной части осевых турбин и перспективы его развития сделан в [1]. Все еще высокая трудоемкость проведения *CFD*-расчетов требует тщательной формулировки оптимизационной задачи и выбора метода поиска оптимального решения с целью уменьшения варьируемых параметров и пробных точек. Приемлемой с точки зрения имеющихся вычислительных возможностей представляется постановка задачи оптимизации формы линии стекинга характерных точек профилей, образующих лопатку, без изменения формы самих сечений. Эта постановка дает возможность определить компромиссное соотношение между профильными и вторичными потерями в точке оптимума по интегральным потерям за счет локального искривления лопатки у торцевых образующих.

Процедуру такого искривления будем называть сложным навалом в отличие от обычного (простого) навала, при котором наклоняется вся лопатка с сохранением прямолинейности линии стекинга.

В данной статье рассмотрена достаточно упрощенная постановка задачи оптимизации навала с учетом смещения сечений только в тангенциальном направлении, которая, как будет показано ниже, дает возможность ограничиться двухпараметрическим представлением линии стекинга.

Для построения параметризованных расчетных сеток использован подход, описанный в [2]. Сечения лопаток кольцевой решетки составлены из реактивных профилей типа ТС-1А [3].

Постановка задачи

Объектом оптимизации является параметрическая модель кольцевой турбинной решетки ($b/l = 1,4$), составленной из профилей ТС-1А ($t/b = 0,713$). Варьируемые параметры представляют собой относительные смещения у корня и на периферии в окружном направлении, которые однозначно определяют форму пера лопатки.

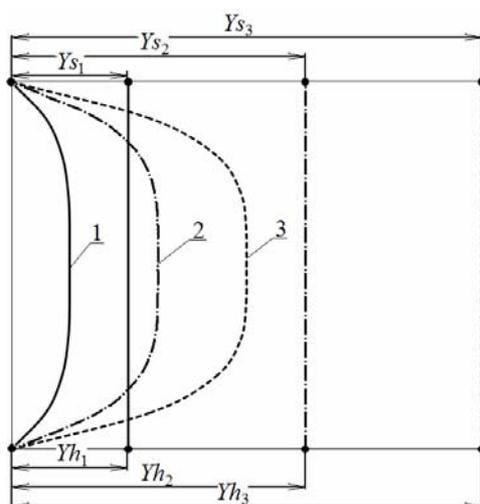


Рис. 1. Кривая стекинга с параметрами ее искривления

На рис. 1 изображены три конфигурации кривой стекинга для трех сочетаний варьируемых параметров, а на рис. 2 изображены соответствующие этим кривым три лопатки. На рис. 2 лопатка 1 соответствует кривой стекинга 1, лопатки 2 и 3 соответствуют 2-й и 3-й кривой стекинга соответственно, изображенных на рис. 1. На рис. 1 и 2 параметры Y у корня и на периферии совпадают, но в общем случае они не привязаны друг к другу. В ходе оптимизации изменялась только форма пера лопатки. Изменение заключалось в смещении сечений лопатки в окружном направлении относительно их исходного положения. Все остальные характеристики кольцевой турбинной решетки оставались неизменными. Для задания формы пера лопатки использовался метод с кривой Безье

четвертого порядка с ограничителем. Данный метод описан в работе [2]. Однако вместо параметра кривой Безье использовалась приведенная высота лопатки, что позволило исключить влияние параметров характеризующих изменение кривой по высоте и как следствие уменьшить количество параметров однозначно задающих форму кривой Безье четвертого порядка с 4-х до 2-х.

Эффективным способом сокращения числа расчетных точек при проведении вычислительного эксперимента, является его планирование [4]. Удобным инструментом являются планы, которые позволяют получить функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, на основании которого в дальнейшем решается оптимизационная задача. В случае 2-х переменных такой план вырождается в полнофакторный трехуровневый эксперимент и требует вычисления 8 точек на границах области и 1 точку в центре плана. Данный план и методы его обработки были разработаны на кафедре НТУ «ХПИ», как дополнение к планам Бокса-Бенкена [5].

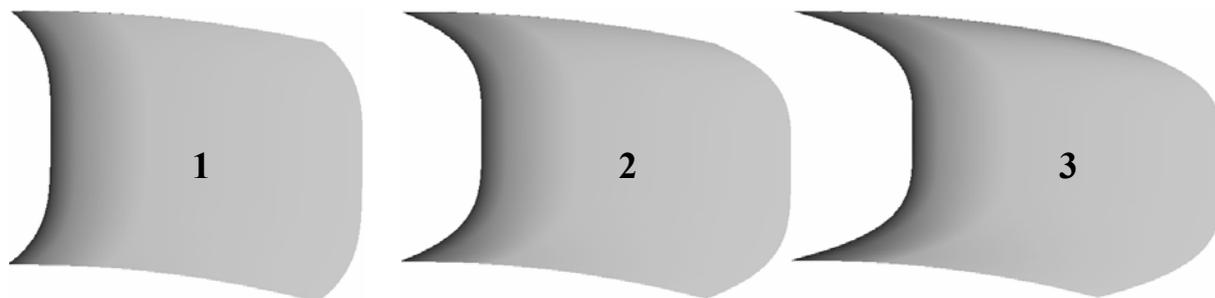


Рис. 2. Параметрическая модель лопатки (вид со стороны спинки)

Задача исследования заключается в нахождении такого сочетания параметров стекинга, при котором кольцевая турбинная решетка имеет минимальные интегральные потери кинетической энергии.

Граничные условия при проведении расчетных исследований были неизменными: на входе задавались заторможенное давление (97759,64 Па) и заторможенная температура (373,15 К), направление потока задавалось нормальным к входу в расчетную область, степень турбулентности задавалась 1%; на выходе задавалось статическое давление (81861 Па). В качестве рабочего тела был выбран воздух. Данным граничным условиям соответствовало дозвуковое истечение из решетки с числом Маха на выходе около 0,5.

Геометрия сечений исходной лопатки заносилась в программу *TOpGrid* [2], где производились деформация лопатки, построение расчетного объема, разбивка его на элементы и экспорт в универсальный формат *CGNS*. Выбор параметров сетки и методика проведения расчетов соответствовали рекомендациям работ [2, 6]. Для расчетов использовался *CFD*-решатель.

Методика и алгоритм проведения оптимизационного исследования

Для поиска оптимальных параметров, характеризующих сложный навал лопатки, предлагается следующая последовательность операций.

1. Создается план вычислительного эксперимента. В заданном диапазоне варьирования параметров, описывающих линию стекинга, находятся точки, в которых будут производиться расчеты.

2. Строятся лопатки, соответствующие параметрам точек плана, а также создаются расчетные области и сетки.

3. Определяются значения функции цели для каждого сочетания параметров. Для этого проводятся *CFD* расчеты и пост-процессинг результатов.

4. Строится полный квадратичный полином функции цели и находится его минимальное значение в заданном диапазоне варьируемых параметров.

5. При необходимости изменяется диапазон варьируемых параметров. В случае если минимум функции цели оказывается на границе диапазона варьирования параметров, последний смещается в сторону этой границы. Если минимум функции цели попадает внутрь диапазона, он сужается, а за новый центр диапазона принимается точка минимума функции цели.

После изменения диапазона повторяются пункты 1-5 до тех пор, пока минимальное значение функции цели не оказывается внутри диапазона варьирования, а ее расчетные значения не совпадают с заданной точностью с полученными на предыдущей итерации.

6. Контрольный расчет течения в оптимальной турбинной решетке для сравнения с результатами, полученными на последнем шаге.

Результаты оптимизационного исследования

С использованием предложенного алгоритма оптимальная форма лопатки заданной кольцевой турбинной решетки была найдена на шестом шаге уточнения диапазона варьирования параметров. Всего были просчитаны 54 конфигурации пера турбинной лопатки. В таблице 1 показаны лучшие значения варьируемых параметров и функции цели для каждого из этапов оптимизации.

Таблица 1. История оптимизации

Этап	Исх.	1	2	3	4	5	6
Диапазон Y_s	0	0,02–0,18	0,16–0,25	0,25–0,38	0,38–0,73	0,73–1,58	0,65–0,94
Диапазон Y_h	0	0,02–0,18	0,16–0,25	0,25–0,38	0,38–0,73	0,73–1,58	0,67–0,98
Y_s	0	0,18	0,25	0,38	0,73	0,73	0,77
Y_h	0	0,18	0,25	0,38	0,73	0,73	0,8
ζ_s , %	4,4010	4,3360	4,3025	4,2506	4,1688	4,1688	4,1687

На этапах 1-5 оптимизации минимум функции цели попадает на границы диапазона варьирования параметров, причем на 4-м этапе функция минимальна на правой границе диапазона варьирования, а на 5-м – на левой. В результате после 6-го этапа, оптимальными значениями параметров оказались $Y_s = 0,77$ и $Y_h = 0,8$.

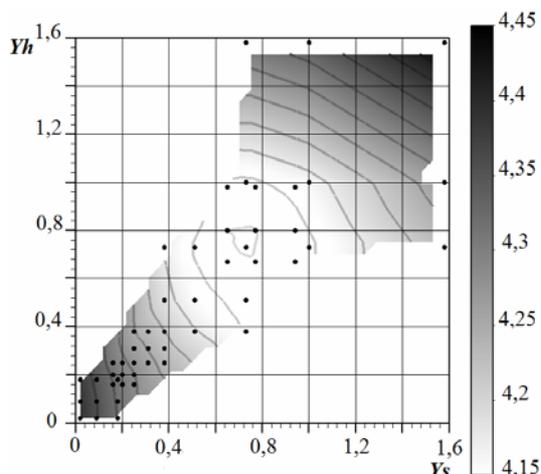


Рис. 3. Изолинии функции цели

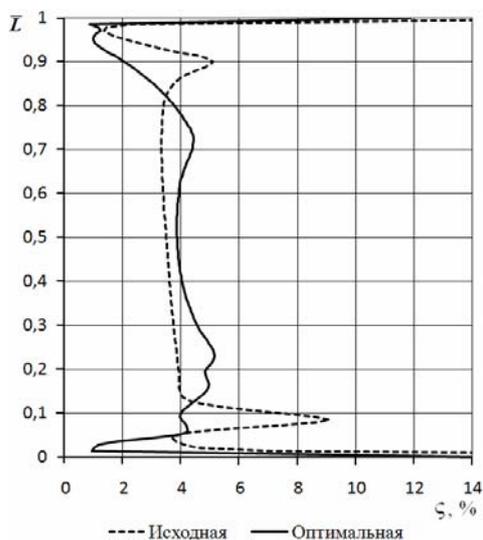


Рис. 4. Распределение коэффициента потерь кинетической энергии по высоте решетки



Рис. 5. Оптимизированная решетка

Изменение угла выхода потока и, как следствие, расхода связано с изменением структуры потока в решетке и с уменьшившимися потерями.

В результате можно утвердить, что предложенный метод позволил найти глобальный минимум функции. В тоже время следует отметить, что в оптимальной решетке изменился расход через решетку на 9 % в сравнении с расходом в исходной

На рис. 3 изображены изолинии функции цели в пространстве параметров Y_s и Y_h . Линии равных значений функции цели имеют не полную форму из-за того, что найденные значения функции распределены неравномерно и большинство из них находятся в окрестности линии $Y_s = Y_h$. Точки на рис. 3 отображают значения параметров Y_s и Y_h на каждом этапе оптимизационного исследования. Сопоставив рис. 3 и таблицу 1, можно увидеть, как выглядит история изменения Y_s и Y_h . Частичное заполнение расчетными точками изображенной области связано с большой трудоемкостью вычислений, и отсутствием возможности равномерно заполнить всю область. Тем не менее, проведенных расчетов достаточно для того чтобы утверждать, что область минимальных значений функции цели была найдена. Она находится вблизи центра исследуемой области. На рис. 3 видно, что функция цели в области минимальных значений изменяется незначительно, из чего следует, что есть некоторая свобода в выборе оптимальных значений Y_s и Y_h .

На рис. 4 изображены распределения коэффициента потерь кинетической энергии. Анализируя данные, представленные на рис. 4, можно объяснить причины снижения потерь в оптимальной решетке по сравнению с исходной. Пики, характеризующие подковообразные вихри в оптимальной решетке стали менее выраженными, но несколько сместились в сторону ядра потока. В ядре потока потери увеличились, но в целом они меньше, чем в исходной решетке. Статическое давление осталось почти неизменным у корня и несколько уменьшилось на периферии.

На рис. 5 изображена оптимизированная турбинная лопатка. В таблице 2 приведены некоторые расчетные характеристики исходной и оптимизированной решеток. Обращает на себя внимание изменившийся расход и действительный угол выхода потока.

решетке. Поэтому в дальнейшем при проведении оптимизации необходимо это учитывать и вводить ограничения на изменение расхода.

Таблица 2. Характеристики исходной и оптимальной решеток

Величина	Расход, кг/с	$\alpha_{1д}$, град	$\zeta_{полн}$, %
Исходная решетка	0,9936	10,11	4,4010
Оптимизированная решетка	1,0922	11,30	4,1687

Выводы

На основании анализа процесса трехмерной оптимизации и его результатов можно сделать следующие выводы:

➤ Предложен алгоритм оптимизации сложного навала турбинных лопаток, основанный на теории планирования вычислительного эксперимента при определении значений параметров, задающих форму линии стекинга, который включает в себя построение параметризованных сеток, проведение *CFD* расчетов и многошаговый поиск оптимальных параметров с использованием функции отклика.

➤ Выбор диапазона варьирования параметров оптимизации существенно влияет на время поиска оптимальных значений.

➤ Функция коэффициента потерь кинетической энергии для исследуемой решетки имеет глобальный минимум с малой кривизной в области минимальных значений, что предоставляет некоторую свободу при формообразовании лопатки.

➤ Основной выигрыш по полным потерям происходит за счет уменьшения потерь от вторичных течений при некотором увеличении потерь в ядре потока.

➤ Алгоритм, сочетающий в себе *CFD*-анализ и планирование вычислительного эксперимента, показал свою работоспособность при проведении трехмерной оптимизации кольцевых реактивных турбинных решеток, обеспечивая существенную экономию машинного времени.

Литература

1. *Бойко А.В.* Оптимальное проектирование проточных частей осевых турбомашин – современное состояние / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 6. – С. 14-21.

2. *Бойко А.В.* Построение параметризованных сеток для трехмерной оптимизации турбинных лопаток / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 6-12.

3. Экспериментальное определение расходных и угловых характеристик решеток профилей С-1 соплового типа: Отчет о НИР № 311 (заключ.) / ХПИ; Руководитель М.Ф. Федоров. – Харьков, 1958. – 37 с.

4. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

5. *Усатый А.П.* Оптимизация ЦВД мощных паровых турбин. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1988. – 187 с.

6. *Бойко А.В.* О возможности замены физического эксперимента на плоской решетке турбинных лопаток вычислительным / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 36-43.