

УДК 621.43

Ф.А. СЛОБОДКИНА^{1,2}, В.В. МАЛИНИН³, А.В. МАЛИНИН¹¹ *Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва*² *ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия*³ *«ООО Сименс», Москва, Россия*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЛОПАТОЧНОЙ МАШИНЫ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ЛОПАТКИ

Методами математического моделирования исследуется обтекание решетки профилей газовой турбины. На основе уравнений газовой динамики для совершенного невязкого газа решается задача обтекания решетки профилей газовой турбины. С привлечением теории пограничного слоя и критериев отрыва определяются области отрыва пограничного слоя на поверхности профиля, затем профиль модифицируется с целью уменьшения области отрыва, уменьшения потерь и интенсивности вихреобразования. Результаты оптимизации проверяются расчетом уравнений газовой динамики, сравниваются с расчетами по уравнениям Навье-Стокса, описывающим вязкое турбулентное течение, и с результатами эксперимента.

Ключевые слова: решетка профилей, обтекание невязким и вязким газовым потоком, пограничный слой, отрыв пограничного слоя, вихреобразование.

Введение

Объектом исследования является решетка профилей лопаточной машины – газовой турбины - в потоке вязкой сжимаемой жидкости.

Известно, что в реальных ситуациях основные потери происходят в области пограничного слоя с неблагоприятным градиентом давления, вызывающим возникновение зоны отрыва потока от стенки и интенсивное вихреобразование. Такие особенности обтекания решетки профилей газовой турбины характерны как для полностью дозвукового обтекания, так и при появлении сверхзвуковой области на спинке профиля с замыкающим скачком уплотнения.

Цель исследования состоит в улучшении качества объекта путем изменения геометрии, направленного на уменьшение зоны отрыва, что приведет к уменьшению потерь и, следовательно, повышению коэффициента эффективности устройства.

В работе представлена реализация двух математических методов, результаты которых сравниваются между собой и с экспериментальными данными:

1. Метод численного расчета обтекания решетки профилей на основе уравнений газовой динамики для идеального газа с последующим вычислением характеристик пограничного слоя и определением зоны отрыва потока на основе критериев подобия [1,2].

2. Метод численного расчета обтекания решетки профилей на основе уравнений Навье-Стокса для вязких турбулентных течений [3,4].

Использование двух математических методов, применяемых последовательно, объясняется тем, что получение решения для невязких течений по методу 1 требует значительно меньшего времени, чем нахождение решений по методу 2. В связи с этим многовариантный расчет по выбору оптимального профиля проводится методом 1 и затем проверяется и уточняется по методу 2.

В статье демонстрируются возможности моделирования дозвуковых режимов течения в решетке профилей с образованием замкнутой зоны отрыва потока. Деформацией профиля удалось в несколько раз сократить область отрыва и снизить потери. Сравнение численных решений с соответствующими экспериментальными результатами подтверждает возможность использования выбранных математических моделей для решения поставленной задачи.

Использование упрощенных методов расчета для решения поставленной здесь задачи, например метода граничных элементов, имеет ряд ограничений и не дает достаточно полной для оптимизации картины обтекания [5].

1. Постановка задачи

В качестве исследуемой решетки профилей рассмотрим плоскую турбинную решетку, для которой имеются экспериментальные газодинамические характеристики. Схема турбинной решетки представлена на рис. 1. Решетка профилей имеет следующие геометрические параметры (см. рис. 1):

$b = 40,942$ мм, $t = 44,749$ мм, $a = 23,517$ мм, $d1 = 3,227$ мм, $d2 = 2,543$ мм, $\beta = 54^\circ$. Характеристики решетки приведены в безразмерном виде: все линейные размеры отнесены к хорде профиля; толщина выходной кромки $d2$ отнесена к размеру выходного сечения межлопаточных каналов a_2 . Геометрические параметры решетки определены аналитически с учетом ее шага t и угла установки γ .

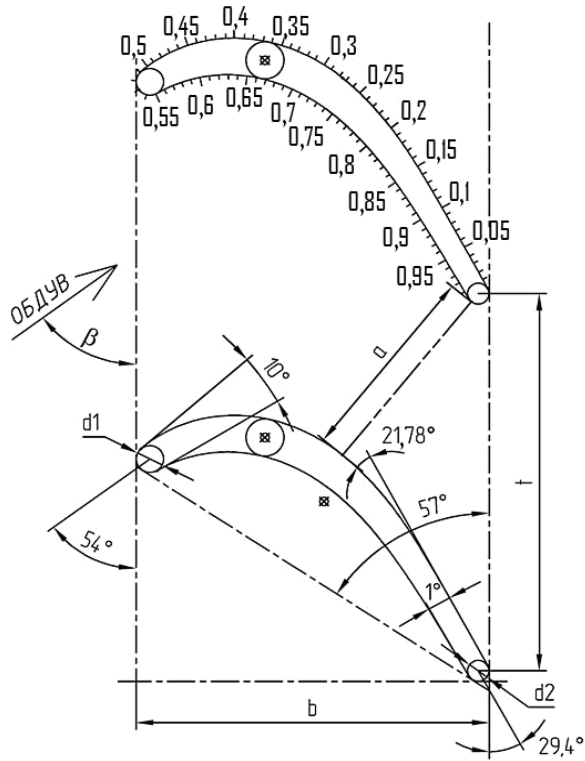


Рис. 1. Исходный профиль, для которого получены экспериментальные данные по продувке

Исходные данные:

1. Задана геометрия профиля лопатки;
2. На входе заданы полное давление и полная температура, равные атмосферным условиям $P_{вх}^* = 10^5$ Па и $T_{вх}^* = 293$ К;
3. На выходе задано статическое давление, выбранное таким образом, чтобы обеспечивать на выходе требуемое экспериментом значение параметра λ_2 по формуле: $P_{вых} = P_{вх}^* \cdot \pi(\lambda)$, $P_{вых}$ – статическое давление на выходе из решетки, $\pi(\lambda)$ – газодинамическая функция: $\pi(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{k/k-1}$ и k – показатель адиабаты;
4. Рабочим телом является воздух, рассматриваемый как невязкий сжимаемый газ;
5. Граничные условия на поверхности лопатки – равенство нулю нормальной составляющей скорости потока (условие не протекания) и адиабатическая стенка;
6. Угол входа потока равен 54 градусам от

вертикали (ось Y) т.е. поток направлен под углом 36 градусов к продольной оси X .

Приведем результаты экспериментальных исследований газодинамических параметров данной решетки.

Распределение коэффициента скорости по лопатке решетки представлено на рис. 2. Величина \bar{S} – относительная криволинейная координата вдоль обводов профиля, S – отсчитывается от точки на окружности $d2$ – по спинке и далее по корыту до нижней точки на окружности $d2$. Величина коэффициента скорости $\lambda_2 = 0,58$ на выходе из решетки. Из анализа рис. 2 следует, что при обтекании выбранной решетки имеются области больших градиентов скорости и, соответственно, давлений, приводящих к отрыву пограничного слоя от стенки (на спинке лопатки).

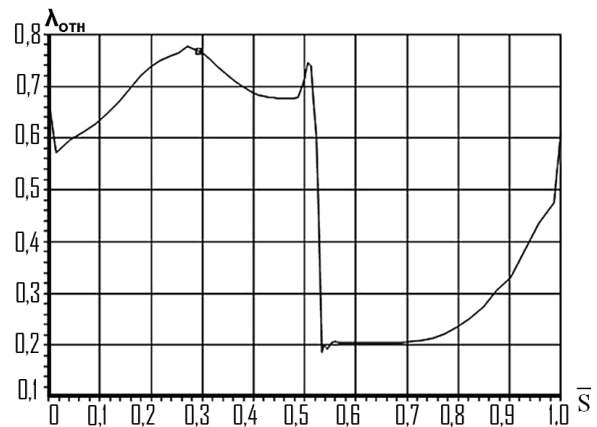


Рис. 2. Изменение величины $\lambda_{отн}$ вдоль координаты \bar{S} исходного профиля

Параметр $\lambda_{отн}$ вводится как величина λ , вычисленная в эксперименте по измерениям давления на профиле.

2. Оптимизация профиля решетки

Оптимизация профиля решетки состоит в таком его изменении, которое позволит сдвинуть область отрыва к концу профиля или существенно ее уменьшить.

Расчеты обтекания решетки первоначально проводятся на основе уравнений газовой динамики с последующим определением точек отрыва с привлечением уравнений пограничного слоя Прандтля и критериев отрыва потока [1, 2].

После получения результатов для выбранной решетки профилей (прототипа) проводится деформация профиля с целью уменьшения области отрыва и расчет повторяется. Таким образом, строится цикл программы расчета, который заканчивается по достижении поставленной цели проверкой результатов на основе модели вязкого турбулентного течения

Коэффициент потерь можно представить в виде суммы потерь на трение на профиле решетки и потерь, связанных с отрывом потока на спинке лопатки $\zeta_{\text{тр}} + \zeta_{\text{отр}}$.

Последние потери являются наиболее существенными, потому их минимизация даст значительный выигрыш в эффективности.

На рис. 3 демонстрируется форма оптимизированного профиля, полученного по изложенным выше методам.

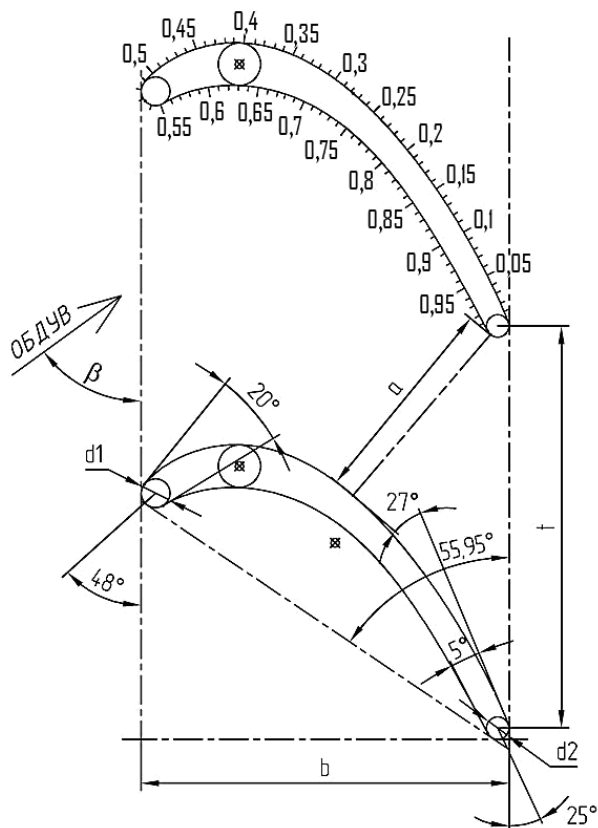


Рис. 3. Оптимизированный профиль с улучшенным обтеканием

На рис. 4 представлено распределение величины $\lambda_{\text{отн}}$ вдоль координаты \bar{S} для исходного (1) и оптимизированного профилей (2) при $\lambda_2 = 0,58$.

Как следует из расчетов, приведенных на рис.4, в областях торможения потока возникают зоны отрыва, размеры которых определяются величиной градиентов λ или, что то же самое, давления.

При деформации профиля соблюдались основные правила, следующие из построения решетки профилей турбины выбранной конструкции: неизменность базовых геометрических параметров.

Сохранность базовых параметров является существенным ограничением при оптимизации решетки профилей, в отличие от оптимизации одиночного профиля, где такие ограничения не выставляются [6,

7]. Улучшенный профиль (см. рис.3) отличается только углами установки.

Необходимо отметить, что ни одна практически значимая задача оптимизации не решается без ограничений.

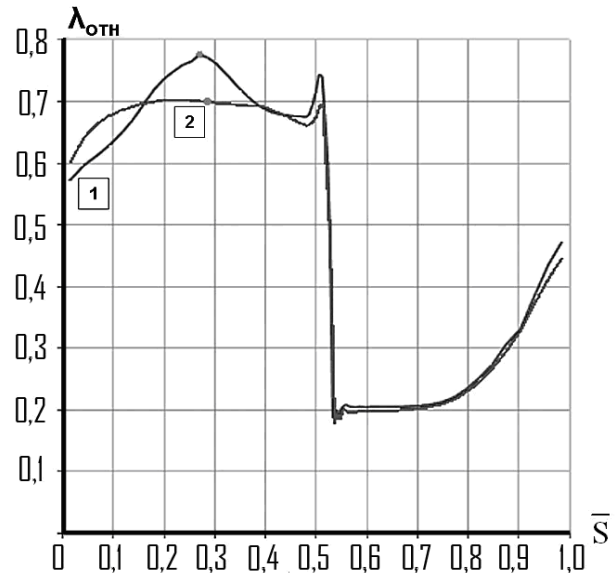


Рис. 4. Изменение величины $\lambda_{\text{отн}}$ вдоль координаты \bar{S} для исходного (1) и оптимизированного профилей (2) при $\lambda_2 = 0,58$

Из сравнения результатов, представленных на рис.4 для распределения коэффициента скорости λ вдоль координаты \bar{S} для исходной и оптимизированной решетки профилей, наглядно виден выигрыш при модификации профиля в распределении λ , а, следовательно, давления и других параметров.

Проведем анализ графиков, представленных на Рис. 4.

1. На диффузорном участке межлопаточного канала исходной решетки разгон газа, представляемый отношением $\lambda_{\text{мах}} / \lambda_2$, равен 33,8% против 20,3% для оптимизированного профиля.

2. В случае исходного профиля присутствует резко выраженное диффузорное течение после горла (отмечено точкой); в случае оптимизированного профиля такое течение имеет значительно более гладкий характер.

3. Интенсивность отрыва на передней кромке, которая определяется отношением $\lambda_{\text{мах}} / \lambda_{\text{мин}}$ (при $S=0,5$), составляет 0,07 для исходного профиля против 0,035 для оптимизированного, то есть интенсивность отрыва после оптимизации уменьшается вдвое.

4. Дисбаланс (разница скоростей схода струй со спинки и корыта) равен 0,098 для исходного профиля против 0,152 для оптимизированного (при норме 0-0,075);

5. Качественная характеристика – гладкость – у оптимизированного профиля также выше. Гладкость определяется частотой смены знака второй производной.

В заключение отметим, что, не смотря на несколько возросший дисбаланс скоростей при сходе струй в конце профиля, приближение остальных показателей к норме позволяет утверждать, что оптимизированный профиль лучше исходного.

3. Проверка результатов оптимизации расчетами уравнений Навье-Стокса

Приведем результаты расчета обтекания исходной решетки и решетки с оптимизированными профилями на основе уравнений, описывающих вязкое турбулентное течение сжимаемого газа. Математическая модель вязкого турбулентного течения построена на уравнениях Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, дополненных двухпараметрической моделью турбулентности [3,4].

На рис.5, 6 демонстрируются результаты проведенного численного исследования.

Анализ результатов расчета на основе уравнений Навье-Стокса показал следующее.

На исходном профиле длина зоны отрыва – составляет: $(L2 - L1) = 0,0237$. В случае оптимизированного профиля протяженность области отрыва – $(L2 - L1) = 0,0089$, то есть зона отрыва меньше в 2,66 раза, где L – относительное расстояние вдоль профиля от точки натекания (лобовой точки) к длине профиля от лобовой точки до задней кромки. $L1$ – точка отрыва потока, $L2$ – точка присоединения.

Отметим также, что интенсивность самого отрыва существенно снижена – максимальное значение числа Маха для исходного профиля равно 0,8888 против 0,8083 для оптимизированного. Приведенные отличия показывают, что общий уровень потерь в каскаде снижается при использовании оптимизированного профиля.

На рис.5 приведены результаты расчета падения полного давления в межлопаточном канале по мере удаления от передней кромки для исходной решетки и оптимизированной.

Величина давления посчитана по среднемассовому расходу в каждом сечении. Из данных, представленных на рис.5, следует, что потери в решетке при использовании оптимизированного профиля уменьшаются на 6,25% по сравнению с исходным. Этот результат свидетельствует о том, что в каскаде выигрыш будет значительно больше.

В заключение рассмотрим сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для трех режимов обтекания, различных по величине λ_2

(см. рис.6). Сплошной линией приведены результаты расчета, значками – результаты эксперимента. Видно, что при $\lambda_2=0,93$ на профиле образуется обширная сверхзвуковая зона.

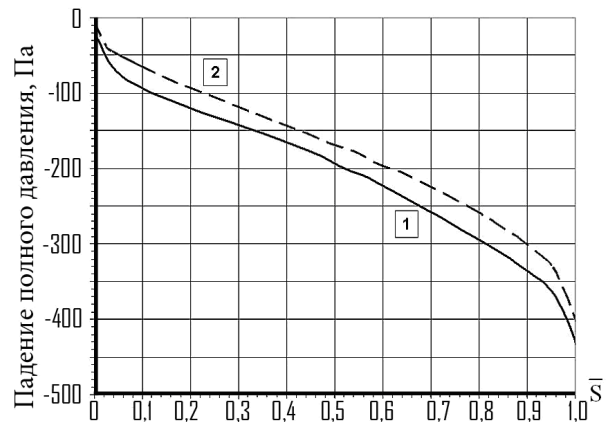


Рис. 5. Падение полного давления по межлопаточному каналу (1 – исходный профиль, 2 – оптимизированный)

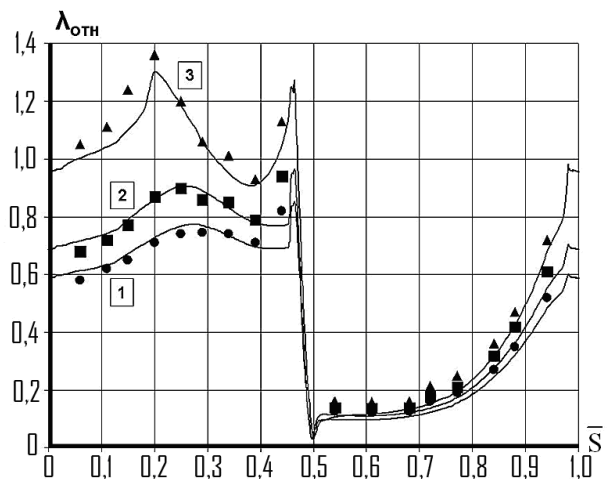


Рис.6. Сравнение расчета (сплошные линии) с данными эксперимента (значки) для распределения параметра $\lambda_{отн}$ вдоль профиля для трех вариантов значений коэффициента скорости на выходе из решетки: 1 – $\lambda_2=0,58$; 2 – $\lambda_2=0,68$; 3 – $\lambda_2=0,93$

Как следует из результатов, приведенных на Рис.6, численный расчет с высокой точностью воспроизводит экспериментальные данные, что является наглядным подтверждением адекватности математической модели, принятой для детального описания течения, исследуемым физическим процессам.

Литература

1. Годунов, С.К. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной

[Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин., Г.П. Прокопов // ЖВМ и МФ. - 1961. - № 6. - С. 1020-1050.

2. Бам-Зелинович, Г.М. Расчет отрыва пограничного слоя [Текст] / Г.М. Бам-Зелинович // Изв. АН СССР, ОТН. - 1954. - № 4. - С. 85.

3. Launder, В.Е. The Numerical Computation of Turbulent Flows [Text] / В.Е. Launder, D.B. Spalding // Comp. Math. Appl. Mech. Eng. - 1974. - Vol. 3. - P. 269-289.

4. Слободкина, Ф.А. Течение жидкости в ступени центробежного насоса [Текст] / Ф.А. Слободкина, В.В. Малинин, Д.Ю. Шигапова // Математическое моделирование. - 2008. - Т. 20, № 10. - С. 51-62.

5. Petrov, A.G. Quadrature formulas for periodic functions and their application to the boundary element

method [Text] / A.G. Petrov // Computational mathematics and mathematical physics. - 2008. - Vol. 48, № 8. - P. 1266-1283.

6. Слободкина, Ф.А. Численное исследование возможности построения оптимальной формы лопатки [Текст] / Ф.А. Слободкина, В.В. Малинин, А.Г. Петров // X Междунар. школа-семинар Модели и методы аэродинамики, Крым, Евпатория, 3 - 12 июня 2010. - С. 157-158.

7. Слободкина, Ф.А. Оптимизация эффективности работы лопаточных машин путем создания формы лопатки минимального сопротивления [Текст] / Ф.А. Слободкина, В.В. Малинин // Российская техническая нефтегазовая конф. и выставка SPE по разведке и добыче. - М.: 26-28 октября 2010. SPE- 135795.

Поступила в редакцию 25.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.В. Кадет, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЛОПАТКОВОЇ МАШИНИ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ФОРМИ ЛОПАТКИ

Ф.О. Слободкіна, В.В. Малінін, О.В. Малінін

Методами математичного моделювання досліджується обтікання решітки профілів газової турбіни. На основі рівнянь газової динаміки для досконалого нев'язкого газу вирішується завдання обтікання решіток профілів газової турбіни. Із залученням теорії граничного шару і критеріїв відриву визначаються області відриву граничного шару на поверхні профілю, потім профіль модифікується з метою зменшення області відриву, зменшення втрат і інтенсивності вихроутворення. Результати оптимізації перевіряються розрахунком рівнянь газової динаміки, порівнюються з розрахунками за рівняннями Нав'є-Стокса, що описують в'язку турбулентну течію, і з результатами експерименту.

Ключові слова: решітка профілів, обтікання нев'язким і в'язким газовим потоком, граничний шар, відрив граничного шару, вихроутворення.

INCREASE OF AN IMPELLER MACHINE EFFICICENCY BY BLADE PROFILE OPTIMIZATION

F.A. Slobodkina, V.V. Malinin, A.V. Malinin

Gas flow in turbine cascade is investigated by numerical simulation method. The problem of Inviscid ideal gas flow in turbine cascade is solved. Profile flow separation regions are determined using boundary layer theory approach and flow separation criteria. Then profile geometry is modified in order to minimize separation zone and correspondingly diminish loses and eddy formation intensity. Optimized profile performance is compared with original one via numerical solution of corresponding Navier-Stokes equations for viscous flow. Comparison of numerical results with experimental data is presented.

Kew words: cascade, inviscid and viscous gas flow, boundary layer separation, eddy generation

Слободкіна Франческа Александровна – д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, профессор Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина и Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: faslobod@gmail.com.

Малинин Виталий Владимирович – канд. физ.-мат. наук, главный специалист департамента Корпоративных Технологий «ООО Сименс», Москва, Россия.

Малинин Алексей Владимирович – инженер-конструктор ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия.