

УДК 621.444

***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В  
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ***

***Хоружий А.С.***

*Инженер-конструктор*

*АО СКБ «Турбина»*

*Россия, г. Челябинск*

***Зубач К.А.***

*Инженер-исследователь*

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак. Е. И. Забабахина»*

*Россия, г. Снежинск*

*Аспирант 3 курса, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Летательные аппараты»*

*Южно-Уральский Государственный университет*

*Россия, г. Челябинск*

**Аннотация:** В настоящей статье рассмотрены проектировочные расчеты осевой турбины с указанием соответствующих методик. Описан подход к параметризации профиля лопатки соплового аппарата и рабочего колеса турбины с использованием кривых Безье. Для параметрической модели ступени турбины в программном комплексе Ansys построена расчетная область. Выполнено математическое моделирование течения в сопловом аппарате и определена его оптимальная геометрическая конфигурация. Далее проведено исследование всей ступени турбины. По результатам расчетов определена геометрическая конфигурация ступени турбины по максимальному коэффициенту полезного действия.

**Ключевые слова:** вычислительная газодинамика, газотурбинная установка, осевая турбина

***MATHEMATICAL MODELING OF FLOW IN THE FLOW SECTION OF  
AXIAL TURBINE STAGE OF A GAS TURBINE POWER PLANT***

***Khoruzhii A.S.***

*Design engineer*

*AO SKB «Turbina»*

*Russia, Chelyabinsk*

***Zubach K.A.***

*Research engineer*

*FSUE «RFNC-VNIITF im. ac. E. I. Zababakhina»*

*Russia, Snezhinsk*

*3rd year postgraduate student, Aerospace Faculty*

*Department of «Aircraft»*

*South Ural State University*

*Russia, Chelyabinsk*

**Abstract:** This article deals with the design calculations of an axial turbine with an indication of the appropriate techniques. An approach to parameterization of the profile of the nozzle blade and turbine impeller using Bezier curves is described. For a parametric model of a turbine stage, a computational domain is built in the Ansys software package. Mathematical modeling of the flow in the nozzle apparatus has been performed and its optimal geometric configuration has been determined. Further, the study of the entire turbine stage was carried out. Based on the results of calculations, the geometric configuration of the turbine stage was determined for the maximum efficiency

**Keywords:** computational gas dynamics, gas turbine plant, axial turbin

В современных ракетных комплексах в связи с увеличением их оснащённости различной электроникой с высоким уровнем энергопотребления, возникает необходимость дополнительных источников питания. Если во время движения электроника получает электроэнергию от генератора, а тот в свою очередь работает от основного двигателя, то на стартовой позиции, основным источником питания являются аккумуляторы, имеющие ограниченную ёмкость и токоотдачу.

Для удовлетворения таких потребностей необходимы энергоустановки, сочетающие в себе большую электрическую мощность, минимальные габариты, и безотказность работы в любых условиях. Всем этим потребностям наиболее полно отвечают газотурбинные энергетические установки (ГТЭУ) [1].

Конструктивными и эксплуатационными преимуществами ГТЭУ являются:

- минимальные габариты при высокой мощности;
- многотопливность;
- бесперебойная работа при низких температурах (до минус 50° С);
- бесперебойная работа в условиях большой запыленности.

Основу ГТЭУ составляет газотурбинный двигатель, приводящий в движение ротор электрического генератора. Конструкция ГТЭУ предусматривает одну ступень компрессора и одну ступень турбины.

Параметры колеса осевой турбины должны определяться исходя из следующих требований: высокого к.п.д., необходимой прочности, технологичности и простоты конструкции. Получение высокого к.п.д. ступени осевой турбины (ОТ) является одной из главных задач.

Объектом исследования, рассматриваемым в данной статье является ОТ ГТЭУ (рис. 1).

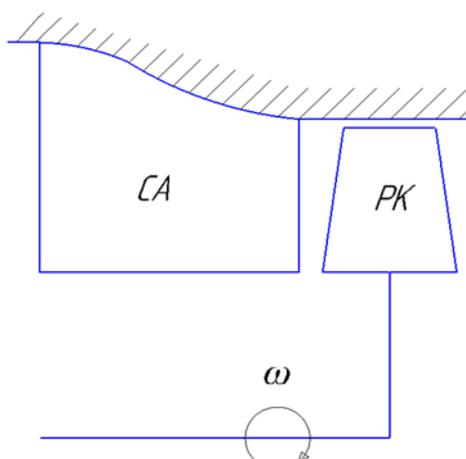


Рис. 1 – Схема ступени осевой турбины (составлено авторами)

СА – сопловой аппарат; РК – рабочее колесо

На первом этапе проектирования выполнен газодинамический расчет ОТ по средним параметрам, по методике, приведённой в работе [2]. При этом, учитывались следующие габаритные ограничения (рис. 2).

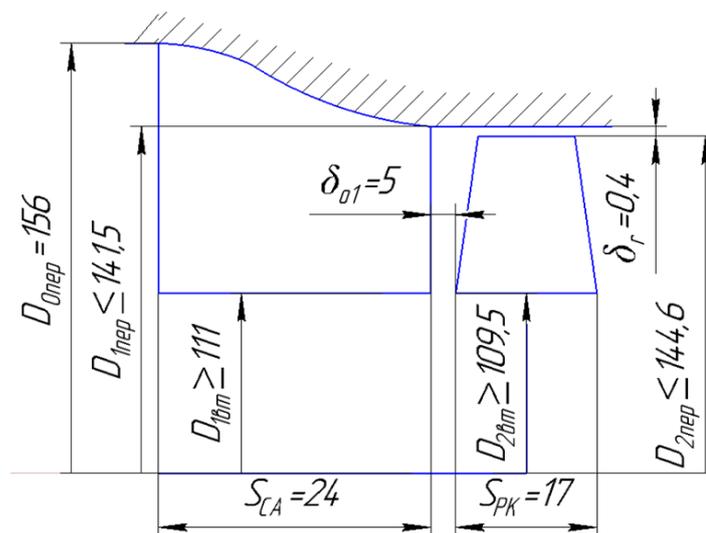


Рис. 2 – Габаритные ограничения проектируемой ступени ОТ

(составлено авторами)

В результате расчета определены основные размеры турбины: высоты лопаток, диаметры их расположения (рис. 3).



Рис. 3 – Трехмерное представление турбины  
(составлено авторами)

Завершающим этапом газодинамического проектирования ступени ОТ ГТЭУ является построение профилей лопаток соплового аппарата и рабочего колеса турбины. Исходными данными для профилирования лопаток служат результаты газодинамического расчета турбины по средним параметрам.

Большинство разработанных методик профилирования сечений лопаток осевых турбин построено на идентичных принципах и на основании одинакового набора исходных данных. Отличие между ними, как правило, заключается в выборе типа кривой, описывающей линии спинки и корытца: параболы, лемнискаты, полинома  $n$ -й степени и др. Перспективным видится использование для этой цели кривой Безье, поскольку она имеет важное свойство – ее кривизна меняется плавно, непрерывно и без разрывов на всем протяжении.

Профиль лопатки соплового аппарата и рабочего колеса турбины представлен параметрической моделью. Контуры спинки и корытца лопаток образованы кривой Безье, входная и выходная кромки заданы дугами окружностей (рис.4.).

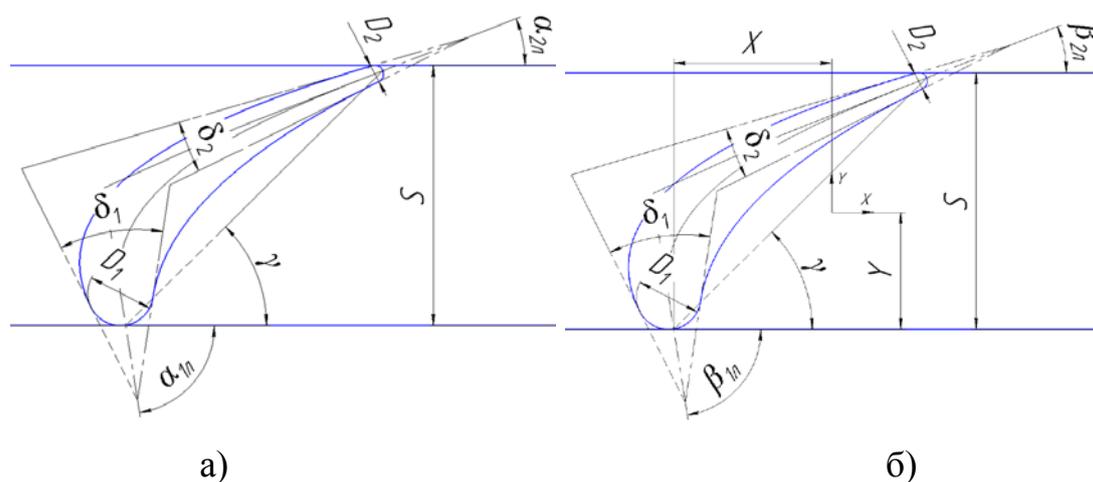


Рис. 4 – Параметрическая модель профиля лопатки: а – соплового аппарата; б – рабочего колеса турбины  
(составлено авторами)

Следующим этапом проектирования ступени ОТ ГТЭУ является математическое моделирование, которое подразумевает анализ течения в проточной части, определение оптимальной геометрической конфигурации профиля лопаток ОТ по критерию максимального к.п.д.

Изменяемыми параметрами лопатки в процессе оптимизации являлись: геометрические параметры (рис. 4 а,б); число лопаток –  $n$ .

Для этой цели строится геометрическая модель расчетной области (рис.5) в программе САПР.

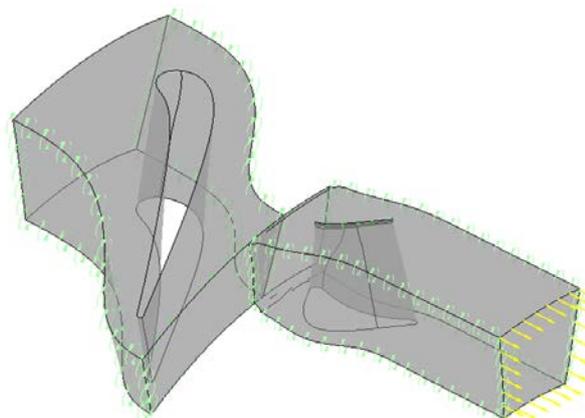


Рис. 5 – Расчетная модель течения в проточной части ступени турбины  
(составлено авторами)

Математическое моделирование проведено в программном комплексе Ansys CFX [3-7], включающий в себя специализированные шаблоны для решения задач турбомашин.

С использованием модуля Ansys TurboGrid построена расчётная сетка (рис. 6), качество которой контролировалось относительно стандартных критериев, встроенных в модуль.

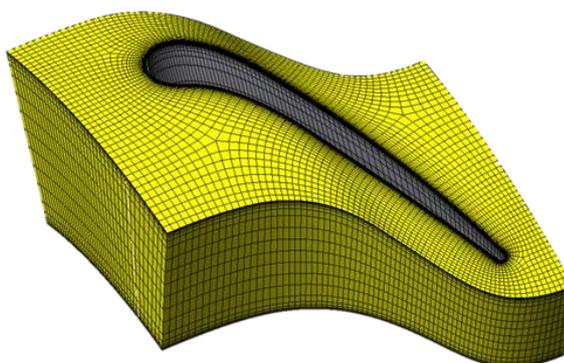


Рис. 6 – Расчетная сетка в межлопаточном канале соплового аппарата  
(составлено авторами)

Рассматривалась задача в стационарной постановке. В качестве модели турбулентности выбрана SST.

Граничные условия задавались следующим образом:

- граница входа Inlet: полное давление, полная температура;
- граница выхода Outlet: статическое давление;
- периферийная граница Shroud: стенка;
- втулочная граница Hub: стенка;
- поверхность лопатки Blade: стенка;

В качестве критерия оптимизации принят коэффициент скорости  $\varphi$  – величина, учитывающая потери в сопловом аппарате.

Численное исследование проводилось с варьируемым числом лопаток соплового аппарата  $n=11; 13; 15; 18$ . Максимальный коэффициент скорости достигнут в варианте соплового аппарата с количеством лопаток  $n=13$  (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты скорости при разном числе лопаток.

$z$	11	13	15	18
$\varphi$	0,93	0,96	0,935	0,94

На рис. 7 показаны результаты расчета оптимизированной сопловой лопатки.

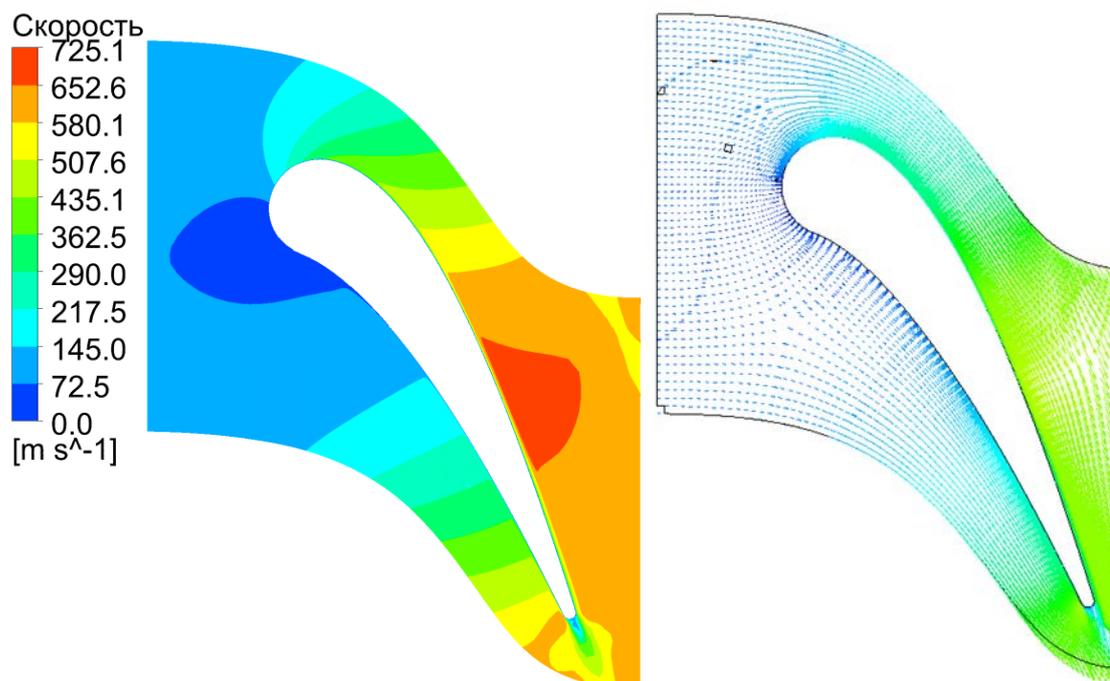


Рис. 7 – Распределение скорости потока в проточной части соплового аппарата  
(составлено авторами)

Как видно из рис.7, в межлопаточном канале отсутствуют пространственные завихрения и неравномерности течения.

Далее варьируя геометрическими параметрами профиля лопатки рабочего колеса турбины проводим математическое моделирование течения в ступени ОТ, по результатам которого должны получить максимальный к.п.д.

Граничные условия задавались следующим образом:

- граница входа: полное давление, полная температура;
- граница выхода: статическое давление;
- периферийная граница: стенка;

- втулочная граница: стенка;
- поверхность лопатки: стенка;
- частота вращения рабочего колеса – 60000 об/мин.

На рис. 8 представлены результаты расчета двух вариантов конфигураций профиля лопатки рабочего колеса турбины.

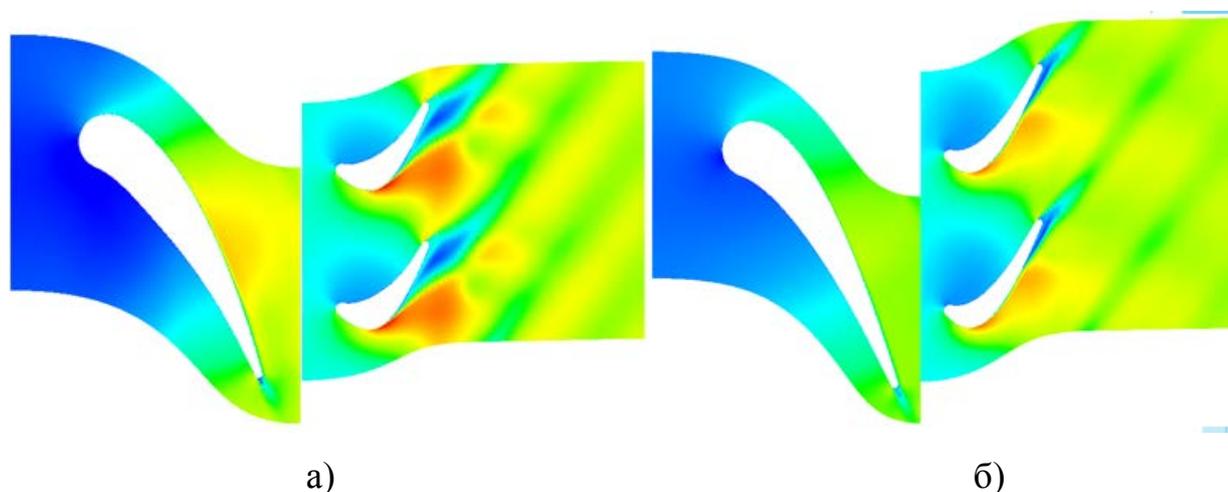


Рис. 8 – скорость потока на средней линии ступени турбины  
(составлено авторами)

а – профиль лопатки построенный по методике; б – оптимизированный профиль

Из рис. 8 видно, что благодаря оптимизации профиля лопатки рабочего колеса турбины удалось устранить отрыв потока со спинки его лопатки. За счет этого удалось повысить к.п.д. на 5% (таблица 2).

Таблица 2 – Значения к.п.д. двух геометрических конфигурациях лопаток турбины

Параметр	Значение, %
$\eta_m$	76.1
$\eta_{opt}$	81

Таким образом, математическое моделирование течения с использованием Ansys CFX позволяет найти оптимальную геометрическую

конфигурацию ступени осевой турбины в рамках существующих технологических ограничений.

На следующем этапе исследования будет выполнена верификация полученных результатов на испытательном стенде, которая позволит судить о правильности построения расчетной модели и алгоритма оптимизации.

### **Библиографический список**

1. Обзор и состояние развития современных газотурбинных установок малой мощности. – <http://stc-mtt.ru/wp-content/uploads/2011/05/0001x.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).

2. Митрохин, В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах. - М.: Машиностроение: 1974 – 250 с.

3. Панов, Д.Ю. Использование ANSYS CFX для прогнозирования характеристик решетки сопловых лопаток газовой турбины с профилированной торцевой стенкой / Д.Ю. Панов, В.В. Рис, Е.М. Смирнов. - <http://www.cadfem-cis.ru/case-studies/art/artcl/ispolzovanie-ansys/> (дата обращения: 15.12.2020)/

4. Krivcov A.V. Gas-dynamic modeling of gas turbine engine components collaborative workflow / A.V. Krivcov, L.S. Shabliy, O.V. Baturin // The open mechanical engineering journal. - 2014. - No. 8. -P. 445-449. DOI: 10.2174/1874155X01408010445

5. Leylek, Z. An investigation into Performance modeling of a small Gas turbine engine / Z. Leylek. -Australia, Published by Air Vehicles Division, 2012. - 31 p. DOI: 10.1115/GT2013-94405

6. Swirydczuk, J. CFD modelling of turbine stage stator/rotor interaction / J. Swirydczuk. - <http://www.task.gda.pl/files/quart/TQ2006/02/TQ210P-E.PDF> (accessed 14 December 2020).

7. ANSYS CFX Tutorials. - [http://congtrinhthep.vn/tailieuketcaucom/Umy/28-01-2012/ans-cfX%20tutor\(draft\).pdf](http://congtrinhthep.vn/tailieuketcaucom/Umy/28-01-2012/ans-cfX%20tutor(draft).pdf) (accessed 16 December 2020).

*Оригинальность 75%*