

Научная статья

УДК 532.529:536.24

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

*Н.Н. Кортиков* ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [n-kortikov@yandex.ru](mailto:n-kortikov@yandex.ru)

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ**

*Аннотация.* Проведена оптимизация системы конвективно-пленочного охлаждения сопловой лопатки первой ступени ГТУ на основе единой информационной среды с включением в нее эффективного метода оптимизации, использующего поверхность отклика, алгоритм не прямой оптимизации на основе принципов самоорганизации (IOSO). В работе предложена математическая модель по расчету температуры стенки при конвективно-пленочном охлаждении на базе эмпирических данных для определения коэффициента теплоотдачи и эффективности пленочного охлаждения. Разработан единый код, позволяющий объединить FORTRAN – программу для вычисления глубины охлаждения перфорированной пластины и оптимизатор IOSO. Результаты расчетов отмечают уменьшение относительного расхода охладителя (с 7% до 6%) при вновь полученных распределениях по отверстиям расхода охладителя, диаметров отверстий выдува и шага системы перфорации (при среднем значении глубины охлаждения – 0,65), благодаря чему возможна прибавка мощности ГТУ в 160 кВт.

*Ключевые слова:* энергетическая газовая турбина; сопловая лопатка, конвективно-пленочная система охлаждения, математическая модель, оптимизация, массовый расход.

*Для цитирования:*

Кортиков Н.Н. Оптимизация системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 4. С. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

N.N. Kortikov ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia✉ [n-kortikov@yandex.ru](mailto:n-kortikov@yandex.ru)

## OPTIMIZATION OF THE COOLING SYSTEM OF THE NOZZLE BLADE OF AN ENERGY GAS TURBINE

*Abstract.* The system of convective-film cooling of the first stage nozzle blade of the gas turbine is optimized on the basis of a unified information environment with the inclusion of an effective optimization method using the response surface, an indirect optimization algorithm based on the principles of self-organization (IOSO). The paper proposes a mathematical model for calculating the wall temperature during convective film cooling based on empirical data to determine the heat transfer coefficient and the efficiency of film cooling. A single code has been developed that allows combining a FORTRAN program for calculating the cooling depth of a perforated plate and an IOSO optimizer. The calculation results indicate a decrease in the relative flow rate of the cooler (from 7% to 6%) due to the newly obtained distributions of the cooler flow rate, the diameter of the blow holes and the pitch of the perforation system (with an average cooling depth of 0.65). Thus, it is possible to increase the power of the gas turbine by 160 kW.

*Keywords:* energy gas turbine; nozzle blade, convective-film cooling system, mathematical model, optimization, mass flow.

*Citation:*

N.N. Kortikov, Optimization of the cooling system of the nozzle blade of an energy gas turbine, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 85–95, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** В [1] сформирована концепция и определены основные этапы освоения отечественных газотурбинных технологий. Первый этап включает разработку и серийное производство отечественных газовых турбин средней и большой мощности. Один из основных объектов работ по 1-ому этапу является агрегат ГТЭ-65. ГТЭ-65 – высокотемпературная газовая турбина со средне-массовой температурой газа на входе в турбину 1368 °С.

Применение охлаждения приводит к снижению КПД ГТУ в целом из-за снижения КПД турбины и потерь цикла на сжатие и прокачку охлаждающего воздуха. На рис. 1 показан анализ влияния величины расхода в отборе охлаждающего воздуха на экономичность ГТУ на примере газотурбинной установки среднего класса мощности ГТЭ-65 [2].

В первой ступени турбины ГТЭ-65 установлено 46 сопловых лопаток с термозащитным покрытием (ТЗП) – пористый ZrO толщиной 0,5 мм. Лопатки имеют конвективно-пленочную схему охлаждения с пористой вставкой в первой полости, ориентированной на спинку.

Давление торможения для потока газа равно  $P^* = 14,9$  бар. Параметры воздуха на входе в систему охлаждения:  $P_B = 15,8$  бар,  $t_B = 422$  °С.

Лопатка является двухполостной. В переднюю полость охлаждающий воздух подается со стороны корневой полки. Из этой полости воздух выходит на наружную поверхность через 12 рядов перфорации, объединенных в 7 групп (рис. 2). Отметим, что в зоне собственно входной кромки

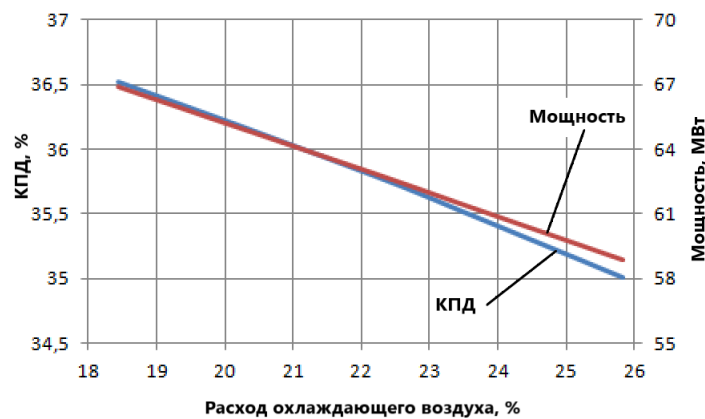


Рис. 1. Влияние расхода охлаждающего воздуха на все ступени турбины на экономичность ГТЭ-65  
 Fig. 1. The effect of cooling air flow in all turbine stages on the efficiency of GTE-65



Рис. 2. Распределение глубины охлаждения вдоль профиля сопловой лопатки  
 Fig. 2. Cooling depth distribution along the nozzle blade profile

предусмотрено 3 ряда отверстий диаметром 1,5 мм, остальные отверстия перфорации передней полости имеет диаметр 0,9 мм.

Во вторую полость лопатки вставлен дефлектор, плотно прилегающий к ребрам. Высота ребер 2 мм, расстояние между ребрами 1,5 мм, толщина ребра 1 мм. Ребра выполнены прерывистыми для интенсификации теплообмена. Коэффициент оребрения стенки лопатки 1,6. Охлаждающий воздух подается в полость дефлектора.

Основной расход воздуха выпускается через отверстия диаметром 2,5 мм, расположенные вблизи внутренней перегородки лопатки (по 25 отверстий с каждой стороны), и раздается в каналы, образованные оребренной стенкой лопатки и стенкой дефлектора. Для снижения температуры воздуха в выходной кромке дефлектора выполнены два ряда отверстий диаметром 1,5 мм по 25 штук в каждом.

За дефлектором полость лопатки загромождена штырьковой матрицей. Диаметр столбиков-турбулизаторов 1,5 мм, шаг по длине щели – 3 мм, шаг по ширине щели – 4 мм. Воздух выпускается через оребренную щель в выходной кромке. Суммарная проходная площадь выходной кромки – 70 мм<sup>2</sup>.

На рис. 2 дано сравнение результатов численного моделирования глубины охлаждения сопловой лопатки (сплошная линия) и опытных данных (треугольники), полученные в работе [3]. По

оси абсцисс рис. 2 указаны номера термопар, уложенные на поверхности сопловой лопатки, и местоположение которых дается на эскизе лопатки внутри рисунка. Анализ представленных данных позволяет заключить о недостаточной глубине охлаждения (меньше 0,6) на корытной части лопатки вблизи ее входной кромки.

Расход охлаждающего воздуха на венец составляет 16,20 кг/с (9,0%). Непосредственно на охлаждение пера лопатки предполагалось подавать 12,60 кг/с (7,0%) охлаждающего воздуха, а 3,60 кг/с (2%) – на пленочную завесу корневой и периферийной полок первых направляющих лопаток (по 1% охлаждающего воздуха на каждую).

### Оптимизация системы охлаждения лопатки турбины

Большинство работ по оптимизации течения и теплообмена в проточных частях газовых турбин посвящено поиску оптимальных аэродинамических характеристик, в частности, обеспечения минимальных потерь кинетической энергии [4]. Для этого необходимо объединить математические модели и программные комплексы с методами поиска наиболее эффективных решений в рамках оптимизационной среды [5].

К числу наиболее перспективных методов поиска оптимальных решений являются *IOSO*-технологии [6, 7]. В процессе оптимизации в *IOSO* на каждой итерации осуществляется построение поверхностей отклика критериев оптимизации и ограничиваемых параметров.

В работе [8] рассмотрена оптимизация профильной части лопаток компрессора низкого давления (КНД) с использованием газодинамического решателя (*ANSYS CFX*) и программы-оптимизатора (*IOSO PM*). В [9] оптимизационное исследование было направлено на повышение угла поворота потока в лопаточном венце и минимизация потерь полного давления. Процесс оптимизации проводился путем интеграции *CAD* и *ANSYS CFX* кодов с программным продуктом многокритериальной оптимизации *IOSO NM*.

Оптимизация конвективно-пленочной системы охлаждения сопловой лопатки в целом представляет собой сложную задачу ввиду многокритериального и многопараметрического характера и необходимости компромисса между тепловыми, гидравлическими и прочностными характеристиками.

Конвективно-пленочная система охлаждения представляет собой многорядную систему отверстий перфорации, в зависимости от уровня температуры газа, охватывающую либо наиболее важные и теплонапряженные участки профиля (входная кромка лопатки), либо всю поверхность профиля.

Многопараметрический и сопряженный характер взаимодействия газодинамических и тепловых процессов, имеющий место при обтекании профиля охлаждаемой лопатки, приводит к тому, что решение задачи оптимизации представляет собой значительные трудности. На выбор геометрических и режимных характеристик системы охлаждения накладываются серьезные ограничения, связанные с влиянием параметров охлаждающего воздуха во внутренней полости лопатки на режим течения завесы из отверстий перфорации.

В целом, под оптимизацией системы охлаждения понимают поиск такой схемы выдува, при которой требуемый уровень температуры стенки достигался бы при наименьшем суммарном расходе охладителя [10].

В настоящей работе постановка задачи оптимизации сводится к следующему: по заданной глубине охлаждения при варьировании двух независимых параметров (шаг системы перфорации и диаметр отверстия) определяются значения параметров, при которых достигается наименьшее значение относительного расхода охладителя.

**Целью** работы является повышение эффективности конвективно-пленочной системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины на основе единой информационной среды, включающей математическую модель, программу расчета глубины охлаждения лопатки и метода поиска оптимального решения, заложенного в программе *IOSO NX GT 2.0* [6].

### Математическая модель, алгоритм и программа расчета глубины охлаждения

Математическая модель для расчета температуры поверхности лопатки основана на рассмотрении теплопередачи через перфорированную пластину, которая является элементом поверхности лопатки, и учитывает выдув системы струй из отверстий перфораций (рис. 3 а, б).

На рис. 3 введены следующие обозначения:  $T_G, T_C$  – температуры горячего газа и охлаждающей жидкости соответственно;  $T_{AW}$  – температура смеси (*fluid*) на стенке при наличии пленочного охлаждения;  $h_0$  и  $h_f$  – коэффициенты теплопередачи до и после пленки на верхней поверхности пластины;  $h_w$  – коэффициент теплопередачи на нижней поверхности,  $U_z$  – скорость газа;  $d$  – диаметр отверстия;  $P$  – шаг перфорации.

Коэффициент теплоотдачи при выдуве завесы записывается аналогично условиям обтекания пластины сверхзвуковым потоком

$$q_w = h_f (T_{AW} - T_w). \quad (1)$$

В этом случае классическая запись коэффициента теплоотдачи, как  $q_w = h(\theta)(T_G - T_C)$ , будет зависеть от безразмерной температуры стенки  $\bar{\theta} = \frac{T_G - T_C}{T_G - T_w}$  и эффективности пленочного охлаждения  $\eta = \frac{T_G - T_{AW}}{T_G - T_C}$ :

$$h(\theta) = h_f (1 - \bar{\theta} \cdot \eta). \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи  $h_f$  зависит от восьми параметров и его эмпирическое выражение записывается с помощью алгебраических формул, представленных в работе [11, 12]:

$$h_f = (\theta, M, DR, Tu, \alpha, P/d, L/d, x/d), \quad (3)$$

здесь  $M$  – параметр вдува,  $DR$  – отношение плотностей основного и вторичного потоков,  $Tu$  – степень турбулентности основного потока,  $\alpha$  – угол выдува завесы,  $\bar{P} = P/d$  – относительный шаг между отверстиями перфорации ( $d$  – диаметр отверстия),  $x/d$  – безразмерная продольная координата,  $L/d$  – безразмерная длина подводящего канала.

Для эффективности пленочного охлаждения  $\eta = \eta(M, DR, Tu, \alpha, P/d, x/d)$  в работе [13, 14] предложена эмпирическая зависимость, которая зависит от шести параметров и дается с помощью 20 алгебраических выражений.

Глубина охлаждения для перфорированной стенки с учетом термических сопротивлений теплопроводности плоской стенки и ТЗП записывается в виде

$$\theta = \frac{\eta \cdot \left[ \psi + \frac{h_f}{h_0} \cdot (1 + \psi Bi_2) \right]}{\left[ \psi + \frac{h_f}{h_0} \cdot (1 + Bi_2 \psi) - (1 - \eta) \cdot (1 + \psi + \psi Bi_1) \right]}, \quad (4)$$

здесь  $\psi = h_w/h_0$  – коэффициент, учитывающий интенсификацию теплообмена при “*сливе*” охладителя внутрь отверстия;  $Bi_1 = h_0 \frac{\delta_w}{\lambda_w}$  – число Био стенки;  $Bi_2 = h_0 \left( \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_{ТЗП}}{\lambda_{ТЗП}} \right)$  – число Био с учетом ТЗП.

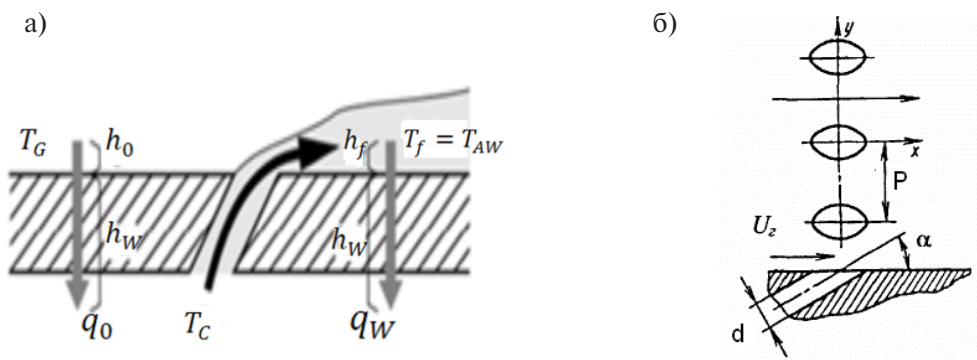


Рис. 3. Теплопередача через перфорированную пластину (а); параметры системы перфораций (б)  
 Fig. 3. Heat transfer through a perforated plate (a); parameters of the perforation system (b)



Рис. 4. Блок-схема единой информационной среды для расчета оптимальных параметров системы охлаждения сопловой лопатки

Fig. 4. Block diagram of a unified information environment for optimal parameters calculation of the cooling system of the nozzle blade

Для решения поставленной задачи создана единая информационная среда, которая объединяет математическую модель, реализованную с помощью программы *OPTIMA*, и оптимизатор *IOSO NXGT 2.0* (рис. 4). Это позволяет проводить поиск глобального экстремума при взаимном влиянии друг на друга (до пяти) независимых параметров.

Программа *OPTIMA* написана автором работы на языке *FORTRAN*, в которой предусмотрена следующая последовательность действий:

- 1) Задание геометрии: высота лопатки, число лопаток в решетке, число отверстий перфорации по высоте лопатки, шаг между отверстиями, диаметр отверстия.
- 2) Задание свойств газа (показатель адиабаты, газовая постоянная).



- 3) Задание давления и температуры торможения горячего газа на входе в сопловую решетку.
- 4) Задание параметров газовой завесы: угол выдува, отношение плотностей газа и охладителя, степень турбулентности газа, местоположения завесы на профиле, безразмерная длина подводящего канала охладителя.
- 5) Определяются числа Био на основании свойств металла лопатки и теплозащитного покрытия.
- 6) Программа работает со значением давления для выбранного пояска перфорации, которое выбирается по эпюре давления вдоль профиля лопатки [3].
- 7) Проводится расчет параметра вдува пленки.
- 8) Проводится расчет эффективности пленочного охлаждения.
- 9) Проводится расчет безразмерного коэффициента теплоотдачи при наличии пленочного охлаждения.
- 10) Определяется коэффициент интенсификации теплообмена, учитывающий вихреобразование на входе подводящего канала [15].

11) Рассчитывается глубина охлаждения по формуле (4) и относительный расход охладителя.

Для стыковки программы *ОПТИМА* с оптимизатором необходимо получение исполнительного файла с расширением *.exe* путем компиляции программы и введения двух дополнительных файлов, содержащих входные и выходные данные (с расширением *.txt*).

Верификация комплекса программ, представленных на рис. 4, проводилась путем сравнения результатов расчетов с точным решением для оптимального значения степени повышения давления для цикла Брайтона [1]. При этом неопределенность не превышало 0,1 % при использовании единой информационной среды, включающий оптимизатор IOSO, в случае отношения темпера-

тур  $\frac{T_3}{T_1} = 5$ , где  $T_3$  – температура на выходе из камеры сгорания,  $T_1$  – температура на входе в компрессор и относительных внутренних КПД компрессора и турбины, равных соответственно 0,85 и 0,90.

### Результаты расчетов и их анализ

На рис. 5 представлена гистограмма, на которой приведено сравнение исходных расходов охладителя (неоптимизированных) с новыми значениями, полученными из условия минимума относительного расхода охладителя, при задании глубины охлаждения, равного 0,65 (или 0,5), для каждого пояска перфорации.

Рис. 6 подчеркивает, что снижение суммарного относительного расхода охладителя с 7% до 6% (при глубине охлаждения 0,65) достигается за счет увеличения диаметра отверстий, что особенно заметно на корытной стороне лопатки.

Со стороны спинки для поясков (№ 1 – № 5) (см. рис. 2) увеличение диаметра отверстия происходит незначительно (не более 20%). На входной кромке лопатки (№ 6 – № 8) при новом варианте системы охлаждения происходит перераспределение диаметров отверстий: увеличение с 1,5 мм до 2,42 мм для отверстия, примыкающего к корыту, и уменьшение с 1,5 мм до 1,35 мм со стороны спинки.

На корытной части профиля увеличение диаметра отверстия имеет место для поясков перфорации № 9 – № 12, где диаметр отверстия возрастает более, чем в два раза по сравнению с исходным вариантом. Пояски 13 и 14 на вогнутой стороне лопатки вблизи задней кромки характеризуются небольшим увеличением диаметра (с 0,9 мм до 1,25 мм).

Снижение потребного относительного расхода охладителя (до 6%) для достижения средней глубины охлаждения, равное 0,65, можно объяснить двумя причинами. Во-первых, при возрастании диаметра отверстия уменьшается зазор между соседними отверстиями, что приводит к формированию более сплошной пелены по высоте лопатки; во-вторых, при “сливе” потока в

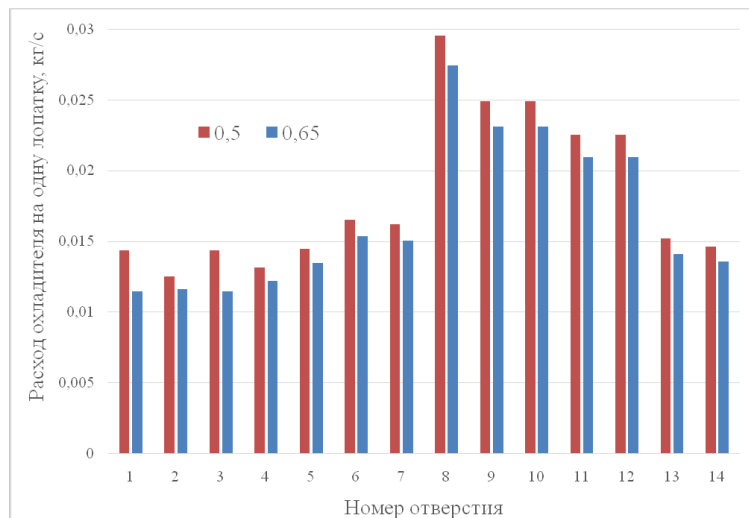


Рис. 5. Сравнение результатов при различной глубине охлаждения  
 Fig. 5. Comparison of results at different cooling depths

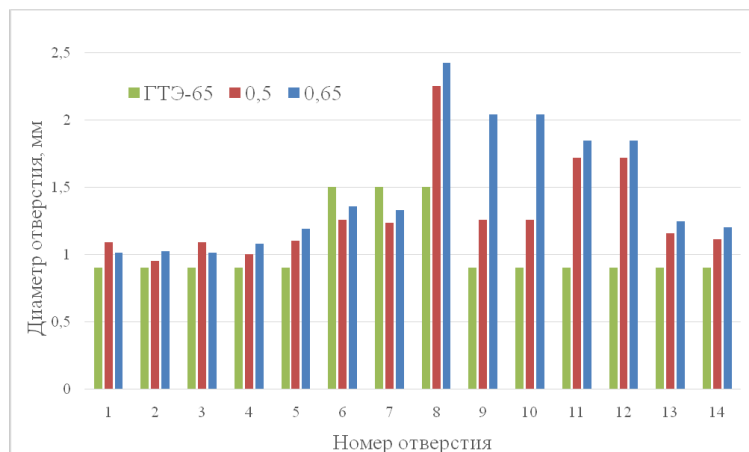


Рис. 6. Распределение диаметров отверстий вдоль профиля лопатки  
 Fig. 6. Distribution of hole diameters along the blade profile

круговое отверстие наблюдается натекание воздуха на наветренную сторону отводного канала с последующим формированием двух вихрей внутри него [15].

### Заключение

Проведена оптимизация системы конвективно-пленочного охлаждения сопловой лопатки первой ступени ГТУ на основе единой информационной среды с включением в нее эффективного метода, использующего поверхность отклика, алгоритм непрямо́й оптимизации на основе принципов самоорганизации (*IOSO*). Единая информационная среда содержит математическую модель по расчету глубины охлаждения перфорированной пластины, алгоритм и программу ее реализации, записанную на языке *FORTRAN*.

По результатам оптимизационных расчетов построены гистограммы, с помощью которых проведен сравнительный анализ исходного и нового распределений по отверстиям расхода охладителя, диаметров отверстий выдува и шага системы перфорации.



Показано снижение с 7% до 6% потребного относительного расхода охладителя при вновь полученных распределениях по отверстиям расхода охладителя, диаметров отверстий выдува и шага системы перфорации (при среднем значении глубины охлаждения – 0,65), благодаря чему возможна прибавка мощности ГТУ в 160 кВт.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Петреня Ю.К.** О программе разработки российских газотурбинных технологий. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. № 1. 2019. С. 8–18. DOI: 10.18721/JEST.25101
- [2] **Рохлин В.Е., Кириченко Р.Е., Золотогоров М.С., Бондюгин М.В.** Постановка расчетно-экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик охлаждаемых лопаток энергетических газовых турбин. LXVII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок “Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ”: сборник докладов. г. Санкт-Петербург. 15–16 сентября 2020 г., С. 49–59. <http://www.power-m.ru>
- [3] **Кривоносова В.В., Кортиков Н.Н.** Анализ и совершенствование системы охлаждения сопловой лопатки газовой турбины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 80–90.
- [4] **Лапшин К.Л.** Компьютерная оптимизация паровых и газовых турбин. – СПб.: СПбПУ. 2018. – 200 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/s18-1
- [5] **Панов Д.О., Рис В.В., Смирнов Е.М.** Многокритериальная оптимизация течения и теплообмена в канале с резким поворотом на 180 градусов / Материалы всероссийской научной конференции с международным участием: XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (21–23 октября 2019 г.). СПб.: ПОЛИТЕХ – ПРЕСС, 2019. С. 300–301.
- [6] IOSO NS GT vers. 2.0. IOSO Technology Center. 2001-2003. Moscow. Сигма Технология [Электронный ресурс] / Режим доступа. <http://www.iosotech.com>
- [7] **Egorov I.N., Kretinin G.V., Fedechkin K.S.** Multi-Level robust design optimization fan. Workshop CE-AS. Vrije Universiteit Brussels (VUB). Brussels. Belgium. 2010. Pp. 1–11.
- [8] **Живирихин М.Л., Боровков А.И., Тамм А.Ю., Тихонов А.С.** Оптимизационное исследование профильной части лопаток компрессора низкого давления. LXVII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок “Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ”: сборник докладов. г. Санкт-Петербург, 15–16 сентября 2020 г. С. 95–103.
- [9] **Блинов В.Л., Бродов Ю.М., Седунин В.А., Комаров О.В.** Параметрическое профилирование плоских компрессорных решеток при решении задач многокритериальной оптимизации. Известия вузов. Проблемы энергетики, 2015. № 3-4. С. 86–95.
- [10] **Vinogradov K.A., Didenko R.A., Karelin D.V., Remizov A.E.** Optimization of film-cooling holes shape by principal components method and CFD [Электронный ресурс] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014. vol. 5B. GT-2014-26400. 14 p.
- [11] **Baldauf S., Scheurlen M., Schulz A., Wirtig S.** Heat flux reduction from film cooling and correlation of heat transfer coefficients from thermographic measurement at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30181. 1–12 (2002).
- [12] **Kortikov N., Polishuk V.** Optimal Heat Flux Reduction Inside Film Cooled Wall. XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”, A. Beskopylny and M. Shamtsyan (eds.), Lecture Notes in Networks and Systems 247, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_2)

[13] **Baldauf S., Scheurlen M., Schulz A., Wirtig S.** Correlation of film cooling effectiveness from thermographic measurements at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30180. 1–14 (2002).

[14] **Kortikov N.** Numerical Optimization of Film Cooling System with Injection Through Circular Holes. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1259 (2021). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_51)

[15] **Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б., Осокина И.В.** Интенсификация теплообмена в расходной трубе с отсосом воздуха в перфорации: численное моделирование и обобщение расчетных данных. XXVIII Сибирский теплофизический семинар. Сборник трудов. Статья № 058. CD ROM. Новосибирск. 2005. 11 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**КОРТИКОВ Николай Николаевич** — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: n-kortikov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7569-3492>

### REFERENCES

[1] **Yu.K. Petrenya,** O programme razrabotki rossiyskikh gazoturbinnnykh tekhnologiy. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. № 1. 2019. S. 8–18. DOI: 10.18721/JEST.25101

[2] **V.Ye. Rokhlin, R.Ye. Kirichenko, M.S. Zolotogorov, M.V. Bondyugin,** Postanovka raschetno-eksperimentalnykh issledovaniy teplogidravlicheskih kharakteristik okhlazhdayemykh lopatok energeticheskikh gazovykh turbin. LXVII nauchno-tekhnicheskaya sessiya po problemam gazovykh turbin i parogazovykh ustanovok “Nauchno-tekhnicheskiye problemy shirokogo primeneniya gazoturbinnnykh i parogazovykh ustanovok v elektroenergetike RF”: sbornik dokladov. g. Sankt-Peterburg. 15–16 sentyabrya 2020 g., S. 49–59. <http://www.power-m.ru>

[3] **V.V. Krivonosova, N.N. Kortikov,** Analiz i sovershenstvovaniye sistemy okhlazhdeniya soplovoy lopatki gazovoy turbiny//Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. S. 80–90.

[4] **K.L. Lapshin,** Kompyuternaya optimizatsiya parovykh i gazovykh turbin. SPb.: SPbPU, 2018. — 200 s. DOI: 10.18720/SPBPU/2/s18-1

[5] **D.O. Panov, V.V. Ris, Ye.M. Smirnov,** Mnogokriterialnaya optimizatsiya techeniya i teploobmena v kanale s rezhim povorotom na 180 gradusov/ Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: XI Seminar VUZov po teplofizike i energetike (21–23 oktyabrya 2019 g.). SPb. POLITEKh — PRESS, 2019. S. 300–301.

[6] IOSO NS GT vers. 2.0. IOSO Technology Center. 2001–2003. Moscow. Sigma Tekhnologiya [Elektronnyy resurs]/ Rezhim dostupa. <http://www.iosotech.com>

[7] **I.N. Egorov, G.V. Kretinin, K.S. Fedechkin,** Multi-Level robust design optimization fan. Workshop CE-AS. Vrije Universiteit Brussels (VUB). Brussels. Belgium. 2010. Pp. 1–11.

[8] **M.L. Zhivirikhin, A.I. Borovkov, A.Yu. Tamm, A.S. Tikhonov,** Optimizatsionnoye issledovaniye profilnoy chasti lopatok kompressora nizkogo davleniya. LXVII nauchno-tekhnicheskaya sessiya po problemam gazovykh turbin i parogazovykh ustanovok “Nauchno-tekhnicheskiye problemy shirokogo primeneniya gaz-

oturbinnnykh i parogazovykh ustanovok v elektroenergetike RF”: sbornik dokladov. g. Sankt-Peterburg, 15–16 sentyabrya 2020 g. S. 95–103.

[9] **V.L. Blinov, Yu.M. Brodov, V.A. Sedunin, O.V. Komarov**, Parametricheskoye profilirovaniye ploskikh kompressornykh reshetok pri reshenii zadach mnogokriterialnoy optimizatsii. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki, 2015. № 3–4. S. 86–95.

[10] **K.A. Vinogradov, R.A. Didenko, D.V. Karelin, A.E. Remizov**, Optimization of film-cooling holes shape by principal components method and CFD [Elektronnyy resurs] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014. vol. 5B. GT-2014-26400. 14 p.

[11] **S. Baldauf, M. Scheurlen, A. Schulz, S. Wirtig**, Heat flux reduction from film cooling and correlation of heat transfer coefficients from thermographic measurement at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30181. 1–12 (2002).

[12] **N. Kortikov, V. Polishuk**, Optimal Heat Flux Reduction Inside Film Cooled Wall. XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”, A. Beskopylny and M. Shamtsyan (eds.), Lecture Notes in Networks and Systems 247, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_2)

[13] **S. Baldauf, M. Scheurlen, A. Schulz, S. Wirtig**, Correlation of film cooling effectiveness from thermographic measurements at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30180. 1–14 (2002).

[14] **N. Kortikov**, Numerical Optimization of Film Cooling System with Injection Through Circular Holes. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1259. (2021) [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_51)

[15] **N.N. Kortikov, N.B. Kuznetsov, I.V. Osokina**, Intensifikatsiya teploobmena v raskhodnoy trube s otsosom vozdukhа v perforatsii: chislennoye modelirovaniye i obobshcheniye raschetnykh dannykh. XXVIII Sibirskiy teplofizicheskiy seminar. Sbornik trudov. Statya № 058. CD ROM. Novosibirsk. 2005. 11 s.

## THE AUTHOR

**KORTIKOV Nicolai N.** — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: [n-kortikov@yandex.ru](mailto:n-kortikov@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7569-3492>

Статья поступила в редакцию 04.08.2021; одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 03.12.2021.

The article was submitted 04.08.2021; approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 03.12.2021.