

УДК 533.6.011.6

DOI: 10.46548/21vek-2020-0951-0004

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ
ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ТУРБОМАШИН**

© 2020

Золотов Александр Николаевич, аспирант кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

Ковальнов Владислав Николаевич, доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Тепловая и топливная энергетика»

Федоров Руслан Владимирович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

*Ульяновский государственный технический университет
(432027, Россия, Ульяновская область, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32,
e-mails: anzolotov@bk.ru, kvn@ulstu.ru, r.fedorov@ulstu.ru)*

Аннотация. Наиболее эффективным путём в реализации методов повышения экономичности турбомашин и их металлоёмкости является увеличение параметров давления и температуры рабочего тела. Технологический процесс изготовления лопаток турбомашин является дорогостоящим и может занимать много времени для подготовки производственной базы для их выпуска. Увеличение входных параметров давления и температуры рабочего тела в газотурбинных установках приводит к возникновению сложных газодинамических и температурных режимов работы лопаточного аппарата. В данных обозначенных условиях прочностные характеристики материалов (в особенности предел эластичности), из которых изготовлен лопаточный аппарат зависят от температуры и изменения ее значения на 10 К может привести к снижению рабочего ресурса в два раза. Эффективность газотурбинной установки повышается на 0,8% при снижении расхода газа, отбираемого из компрессора для охлаждения дисков газовой турбины на 2% [1–2]. На основании вышеизложенного для создания лопаток турбомашин необходимо применение методов математического моделирования. Численные методы выступают основным наиболее эффективным инструментом для анализа и поиска наиболее перспективных способов охлаждения лопаток турбомашин на стадии их проектирования в условиях производства. Применение методов численного моделирования процессов необходимо для определения взаимодействия вязких и невязких течений, турбулентного теплообмена в условиях благоприятного и неблагоприятного градиентов давления, теплообмена во вращающихся каналах, отрыва пограничного слоя и прочих факторов. Одним из перспективных способов реализации охлаждения лопаток турбомашин является применения охлаждения на основе процесса газодинамической температурной стратификации потока рабочего газа.

Ключевые слова: численное моделирование, тепловая защита, конвективно-плёночное охлаждение, программно-информационный комплекс, дисперсный поток, газодинамическая температурная стратификация.

**MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL STUDY OF GAS DYNAMIC TEMPERATURE
STRATIFICATION PROCESSES IN THE COOLING SYSTEM OF THE BLADE OF TURBOMACHINE**

© 2020

Zolotov Alexander Nikolaevich, post-graduate student of the Department of Heat and fuel power engineering

Kovalnogov Vladislav Nikolaevich, doctor of technical sciences, associate professor of the
Department of Heat and fuel power engineering

Fedorov Ruslan Vladimirovich, candidate of technical sciences, head of the
Department of Heat and fuel power engineering

Ulyanovsk state technical University

(432027, Russia, Ulyanovsk, 32 Severny Venets street, e-mails: anzolotov@bk.ru, kvn@ulstu.ru, r.fedorov@ulstu.ru)

Abstract. The most effective methods for improving the efficiency of turbo machines and their metal consumption are to increase the pressure and temperature parameters of the working fluid. The classic manufacturing process of turbo machine blades is very expensive and under standard conditions can take a long time to prepare the production base for production. The increase of input parameters of pressure and temperature of the working medium in gas turbine plants leads to a complex gas-dynamic and thermal modes of operation of the blade unit. Under these specified conditions, the strength characteristics of the materials (especially the elastic limit) from which the blade is made depend on the temperature and a change in its value by 10 K can lead to a two-fold reduction in the working life. The efficiency of a gas turbine plant increases by 0.8% with a 2% reduction in the consumption of gas taken from the compressor to cool the gas turbine disks [1–2]. Based on the above, the creation of turbo machine blades requires the use of mathematical modeling methods. Numerical methods are the main and most effective tool for analyzing and searching for the most promising ways to cool the blades of turbo machines at the design stage in production conditions. The use of numerical process modeling methods is necessary to determine the interaction of viscous and in viscid flows, turbulent heat exchange under favorable and unfavorable pressure gradients, heat exchange in rotating channels, separation of the boundary layer, and other factors. One of the promising ways to implement cooling of turbo machine blades is the use of cooling based on

the process of gas-dynamic temperature stratification of the working gas flow.

Keywords: mathematical modeling methods, numerical methods, thermal protection, convective film cooling, software and information complex, dispersed flow, gas-dynamic temperature stratification.

Введение. Технология производства турбомашин и их лопаточного аппарата является очень дорогостоящей и может занимать время до 1 года. Следовательно обеспечение тепловой защиты лопаток турбомашин является основным из методов повышения их технико-тактических характеристик, увеличения срока службы, сокращение стоимости издержек на обслуживание.

Основным методом обеспечения работы лопаток в условиях экстремально высоких температурных и газодинамических режимов является разработка эффективных способов их охлаждения.

Трудоемкость процесса разработки высокоэффективных способов охлаждения лопаток турбомашин может достигать 45 % от общей трудоемкости изготовления газотурбинной установки в целом. Это обуславливается наличием объемных газодинамических, тепловых и прочностных расчетов. Лопатки турбомашин находятся в наиболее сложных газодинамических и температурных условиях работы, что сказывается на пределе эластичности материала из которого изготовлены лопатки турбомашин. Увеличение температуры рабочего вала турбомашин на 10 К приводит к снижению расчетного ресурса лопаточного аппарата вдвое [3-5]. Одним из основных инструментов отработки новых способов охлаждения лопаток турбомашин, который сокращает большие производственные издержки на проектирование и отработку конструкции является применение методов математического моделирования и численных методов. Одним из перспективных методом охлаждения является использование процесса газодинамической температурной стратификации. Данный метод позволяет повысить ресурс лопаток турбомашин за счет уменьшения их температуры и снижения неоднородности ее распределения. Однако четкие технологические рекомендации по использованию данных процессов в литературе отсутствуют.

Остается открытым вопрос отсутствия надежных методов математического моделирования для прогнозирования распределения температуры по поверхности и в теле лопатки в зависимости от применяемых технологических решений охлаждения, в том числе с использованием процесса газодинамической температурной стратификации. В настоящее время существуют различные комплексы программ для оценки и расчета теплового состояния элементов энергоустановок. В их количество входят следующие программные средства: *ANSYS*, *LMS Virtual.Lab*. К их достоинствам можно отнести возможность внесения изменений в геометрию моделируемых элементов, возможности модернизации обмена данными между расчетными модулями и возможность сравнения динамических моделей между собой. Основным недостатком данных программных средств, в отличие от предлагаемо-

го проекта, что не всегда есть возможность учитывать влияние распределения температуры по перу лопатки турбомашин в нестационарной постановке на граничные условия теплообмена с учетом газодинамической обстановки течения рабочего газа в межлопаточном канале.

Абсолютная погрешность определения теплового состояния лопатки турбомашин на этапе ее автоматизированного проектирования не должна быть более 30 К [4].

Большой вклад в разработку способов повышения эффективности охлаждения лопаток турбомашин внесли Г.П. Нагога, С.З. Копелев, А.Ф. Слитенко, А. Э. Роттэ, Э. Шмидт и другие [1-5].

Целью работы является создание методов моделирования, в системе охлаждения лопаток турбомашин, процессов газодинамической температурной стратификации.

Материалы и результаты исследования. Определение коэффициента теплоотдачи при расчете теплового состояния лопаток турбомашин для обеспечения необходимой точности должно выполняться максимально точно. Важно учитывать нестационарные эффекты газодинамического характера газотурбинной установки, которые влияют на ее работу [6-7].

Коэффициент теплопроводности лопаток турбомашин зависит от температуры как и значения плотности материала и теплоемкости. Граничные условия теплообмена лопатки турбомашин задаются для каждой из поверхностей. Необходимость решения задачи в нелинейной постановке вызвана изменением температуры в широких пределах. Нестационарная задача теплопроводности в трехмерной постановке для лопатки турбомашин можно представить выражением (1). Начальные и граничные условиями третьего рода в аналитической форме для поверхности со стороны охладителя, рабочего газа и со стороны газа в канале разделения потока записываются согласно выражениям (2) – (4).

$$c_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\lambda_{\pi} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = a_z (T_r - T_{w1}); \quad (2)$$

$$\lambda_{\pi} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = a_{охл} (T_{w2} - T_{охл}); \quad (3)$$

$$\lambda_{\pi} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = a_z (T_{w3} - T_{z2}); \quad (4)$$

Переход от уравнения теплопроводности к конечно-разностному уравнению осуществляется с использованием метода тепловых балансов. Система уравнений, которая описывает процесс теплоотдачи на поверхности лопатки турбомашин состоит из совокупности дифференциальных уравнений: теплоотдачи, энергии, движения, неразрывности, состояния [8-10]. При использовании метода охлаждения лопа-

ток турбомашин способом газодинамической температурной стратификации в эту систему включается уравнение эффективности завесы:

$$\theta = (T_r - T_{ad w}) / (T_r - T_{w0}); \quad (5)$$

В лопаточном аппарате турбомашин течение дисперсного потока рабочего газа в дозвуковом тракте не имеет в пограничном слое поперечного перемещения частиц [11–14]. Коэффициент восстановления температуры определяется следующим выражением:

$$r_1 = \sqrt[3]{Pr}; \quad (6)$$

Для сверхзвукового потока зависимость примет иной вид:

$$r_2 = \frac{\sqrt[3]{Pr}}{1 + 28,6G^{0,3}} \quad (7)$$

Адекватность метода математического моделирования и численного метода турбулентного дисперсного пограничного слоя с учетом газодинамической температурной стратификации, проверялась путем сопоставления опытных данных с расчетными коэффициентами теплоотдачи на корыте и спинке лопатки [15–16]. Некоторые результаты сопоставления обозначенных значений показаны на рисунке 1.

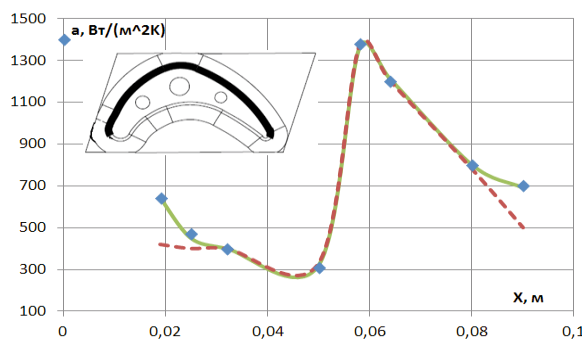


Рисунок 1 – Сопоставление значений коэффициентов теплоотдачи на спинке при $Re=2,16 \cdot 10^5$

Разработанные численные методы реализованы в программно-информационном комплексе. Базовый комплекс внедрен в систему автоматизированного проектирования САПР *SolidWorks*. Отдельным программным продуктом выделен комплекс программ для расчета теплового состояния лопаток турбомашин. Программно-информационный комплекс содержит массивы данных по свойствам конструкционных материалов, рабочих тел и теплоносителей, включает в себя отдельные модули расчета, анализа геометрии проектируемой лопатки и визуализации результатов с возможностью представления массива данных в табличной форме.

На стадии исследования было выявлено и реализовано в программном продукте три основных способа применения техники охлаждения лопатки турбомашин с использованием процесса газодинамической температурной стратификации, суть которого заключается в интенсификации процесса теплоотдачи между сверхзвуковым и дозвуковым дисперсными потоками [4]. Программно-информационный комплекс содержит базы данных, дополняемая результатами исследований данного феномена.

Структурная схема программно-информационного комплекса представлена на рисунке 2. На рисунке 3 представлена зависимость координаты вдоль корыта лопатки турбомашин от температуры поверхности лопатки турбомашин в контрольном сечении при использовании различных способов охлаждения.

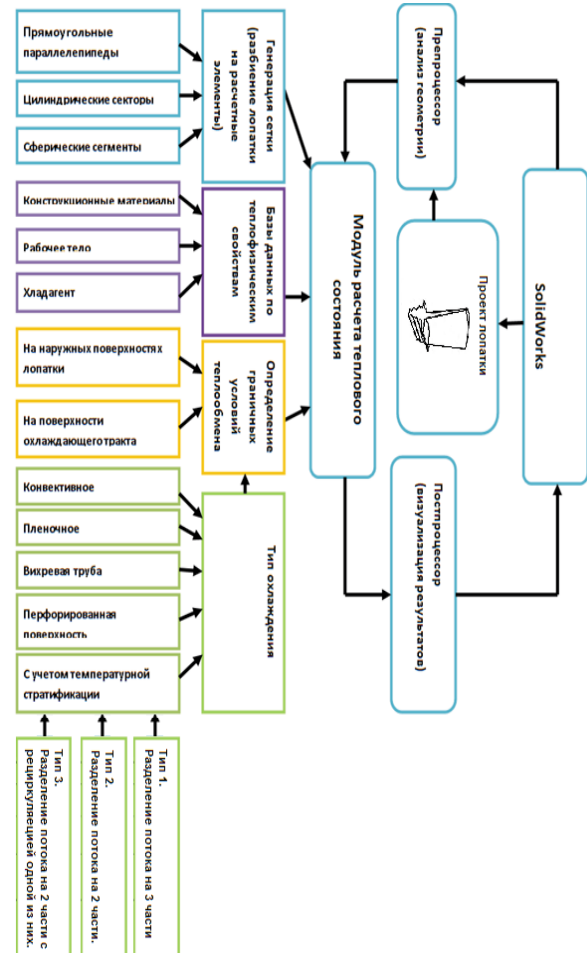


Рисунок 2 – Структурная схема программно-информационного комплекса

На основании зависимости определения температуры в контрольной точке лопатки турбомашин от количества расчетных элементов в сетке установлено, что при разбиении модели лопатки на 80000 элементов и более, обеспечивается необходимая точность исследования не более 30 К.

Результаты теплового расчета лопаточного аппарата турбомашин с конвективным методом охлаждения показывают, что максимально подвержено перегреву выходная кромка пера лопатки. Что подтверждается экспериментальными данными [17–20].

Численное исследование показало, что в системе комбинированного охлаждения на основе применения процесса газодинамической температурной стратификации неравномерность распределения температуры по перу тела лопатки уменьшается, а максимальная температура лопатки снижается до 100 К. Также удалось показать, что использование данной схемы приводит к уменьшению неравномерности распределения температурного поля по перу лопатки турбомашин.

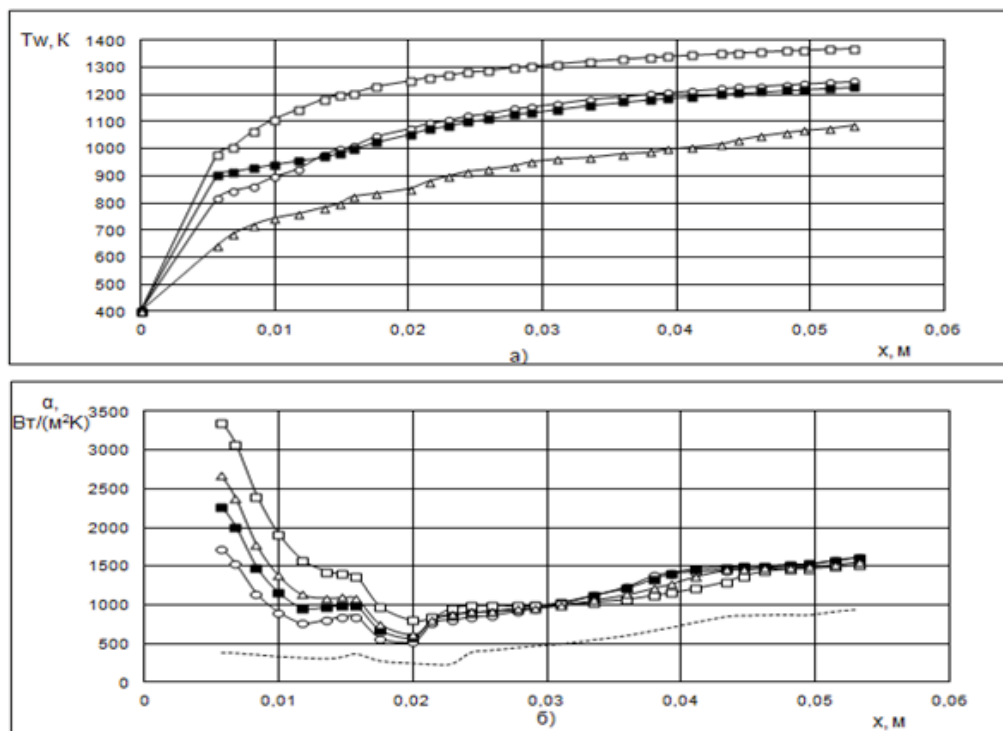


Рисунок 3 – Расчетные зависимости для спинки лопатки: а) влияния адиабатной температуры стенки по длине спинки лопатки от вида охлаждения; б) коэффициента теплоотдачи по длине спинки лопатки от вида охлаждения; о – Второй способ реализации охлаждения на основе газодинамической температурной стратификации с разделением на две части потока рабочего газа, более нагретый направляется вдоль поверхности корыта лопатки, менее нагретый вдоль спинки; ■ – Первый способ реализации охлаждения на основе газодинамической температурной стратификации с разделением на три части потока рабочего газа; Δ – относительная площадь $f=0,004$, $n=2$. Распределение температуры лопатки турбомашин контрольного сечения по поверхности корыта: 1 – Конвективное охлаждение; 2 – Первый способ реализации охлаждения на основе газодинамической температурной стратификации с разделением на три части потока рабочего газа; 3 – Третий способ реализации охлаждения на основе газодинамической температурной стратификации с разделением на две части потока рабочего газа. Более нагретый направляется в рабочую часть турбомашин, менее нагретый отводится вне рабочей части. Доля рециркуляции потока – 20 %.

Исходя из анализа информации, полученной с использованием программного комплекса, установлено, что с увеличением степени турбулентности происходит повышение значения коэффициента теплоотдачи, но при превышении значения T_i в 4 % происходит снижение коэффициента теплоотдачи. Наибольшая эффективность охлаждения лопаток турбомашин будет достигаться при значении коэффициента турбулентности $T_i=4\%$.

Применение способа охлаждения лопаток турбомашин методом газодинамической температурной стратификации позволяет существенно уменьшить ее температуру. Разность температуры лопатки между первым способом реализации газодинамической температурной стратификации и конвективно-плечным охлаждением составляет до 100K. Ввиду вышеизложенного, способ охлаждения на основе газодинамической температурной стратификации потока рабочего газа позволяет увеличить эффективность тепловой защиты лопаточного аппарата до 1,4 раза. Преимущество использования второго метода охлаждения на основе газодинамической температурной стратификации потока рабочего газа в прочной части турбомашин, является значительное уменьшение разницы распределения температурного

поля между корытом и спинкой лопатки. Применение третьего способа охлаждения с использованием газодинамической температурной стратификации позволяет максимально уменьшить температуру поверхности лопатки, но ввиду рециркуляции части потока наблюдается снижение ее КПД.

Заключение. Разработанный программно-информационный комплекс может быть использован при проектировании новых методов охлаждения лопаток турбомашин, в том числе с использованием процесса газодинамической температурной стратификации. Использование способа охлаждения лопаток турбомашин методом газодинамической температурной стратификации позволяет увеличить эффективность охлаждения лопаточного аппарата турбомашин более чем в 1,4 раза.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации, проект НШ-2493.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Нагога Г.П. Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин: учеб. пособие. – М.: Изд. МАИ, 1996. – 100 с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука,

1974. 711 с.

3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

4. Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Тепломассообмен и гидродинамика турбу-лизированных потоков. Киев. Наукова Думка, 1985. 295 с.

5. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Шукин. М.: Машиностроение, 1993. 288 с.

6. Математическое моделирование и исследование газодинамической температурной стратификации в дисперсном потоке / В.Н. Ковальногов [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 1 (31). – С. 40–46.

7. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Цветова Е.В., Петров А.В. Математическое моделирование и исследование газодинамической температурной стратификации в дисперсном потоке // Автоматизация процессов управления, 2013. – №1. – С.40-46.

8. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А. Исследование теплового состояния лопаток турбомашин с помощью программно-информационного комплекса // Известия МГТУ «МАМИ». Сер. Транспортные средства и энергетические установк. – 2014. – № 4 (22), Т. 1. – С. 27–32.

9. Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Generalov D.A. Modeling, Research and Development the Technology of Cooling of Turbine Engine Blades // AIP Conference Proceedings, 1648, 850032 (2015); doi:10.1063/1.4913087.

10. Ковальногов Н.Н., Ковальногов В.Н. Программно-информационный комплекс для анализа теплового состояния лопаток турбомашин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2003. – № 3. – С. 36–39.

11. Золотов, А.Н. Моделирование и исследование технологии тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин с использованием газодинамической температурной стратификации / В.Н. Ковальногов, А.Н. Золотов, М.И. Корнилова // Автоматизация процессов управления. – 2015. – №4. – С.101 – 107

12. Zolotov A.N., Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Khakhaleva L.V. The modeling of influence of the external turbulence over the heat transfer towards the surface of turbomachinery blades // AIP Conference Proceedings 1863, 560017 (2017); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4992700>

13. Zolotov A.N., Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Generalov D.A., Khakhalev Y.A. Numerical research of turbulent boundary layer based on the fractal dimension of pressure fluctuations // AIP Conference Proceedings, 1738, 480004 (2016); doi: 10.1063/1.4952240

14. Zolotov A.N., Kovalnogov V.N., Fedorov R.V. Development and study of technical solutions for turbine blades cooling // AIP Conference Proceedings, 1978, 470024 (2018); doi: <https://doi.org/10.1063/1.5044094>

15. Золотов А.Н. Разработка программно-информационного комплекса для исследования теплового состояния лопаток турбомашин и отработки технологий их тепловой защиты / Д.А. Генералов, А.Н. Золотов // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» Том. 1 – Севастополь, 2015. С. 90-92

16. Ковальногов В.Н. Моделирование, исследование и разработка технологии тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин / В.Н. Ковальногов А.Н. Золотов, М.И. Корнилова, Р.В. Федоров // Сборник тезисов докладов и сообщений 15 Минского международного форума по тепло- и массообмену. Том 3. Минск, 2016. – С.331 - 335.

17. Ковальногов В.Н. Моделирование эффективности тепловой защиты лопаток газотурбинной установки / В.Н. Ковальногов А.Н. Золотов, Р.В. Федоров // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева –

М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – С. 255-257

18. Золотов А.Н. Численное исследование теплового состояния лопаток турбомашин / А.Н. Золотов, М.И. Корнилова // <http://ify.ulstu.ru/projects/233> Пятый Ульяновский молодежный инновационный форум 2016 г. Номер статьи: F-6_233

19. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск: УлГТУ, 1996. 246 с.

20. Ковальногов Н.Н., Фокеева Е.В. Оптимизация параметров процесса газодинамической температурной стратификации в дисперсном потоке // Проблемы энергетики. – 2010. – №11-12. – С. 3–11.

Статья поступила в редакцию 14.11.2020

Статья принята к публикации 11.12.2020