

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.165

DOI 10.18698/0536-1044-2016-11-26-33

## Результаты численных исследований неоднородности высокотемпературного потока, вызванной кромочными следами за сопловыми лопатками с пленочным охлаждением


А.А. Сидоров, С.В. Киселёв, Т.В. Полникова

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 4

## The Results of Numerical Research of High-Temperature Flow Heterogeneity Caused by Edge Wakes of Nozzle Blades with Film Cooling

A.A. Sidorov, S.V. Kiselev, T.V. Polnikova

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, 248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenov St., Bldg. 4

 e-mail: sidpol1@rambler.ru, SKV1985@yandex.ru, polnikova\_t@rambler.ru

**i** Обеспечение вибрационной надежности лопаточного аппарата турбомашин — одна из основных задач турбостроения. Причиной колебаний рабочих лопаток часто является неоднородность потока, вызванная кромочными следами за сопловыми лопатками. В перспективных паровых и газовых турбинах, которые будут работать при сверхвысоких температурах рабочего тела, эта задача приобретает первостепенное значение. Однако в научной литературе отсутствуют сведения о влиянии способа охлаждения сопловых лопаток на неоднородность потока за ними. Исследовано влияние пленочного охлаждения плоской решетки сопловых профилей на неоднородность высокотемпературного потока, вызванную кромочными следами за решеткой. Исследование состояло из двух частей. В первой части проведено сравнение неоднородности потока за решеткой без охлаждения и с охлаждением. Во второй части исследовано влияние конструкции системы пленочного охлаждения на величину неоднородности потока. Численный эксперимент проведен в программной среде STAR-CCM+v9.02.005. Расчеты показали, что способ охлаждения профилей оказывает существенное влияние на неоднородность высокотемпературного потока. Результаты исследований могут быть использованы при разработке конструкций перспективных паровых и газовых турбин.

**Ключевые слова:** профиль сопловой лопатки, аэродинамический след, высокотемпературный поток, охлаждение профилей, математическое моделирование.

**i** Ensuring the vibrational reliability of turbomachinery blading is one of the main objectives in turbine manufacturing. Rotor blade vibrations are often the result of the flow heterogeneity caused by the edge wakes of nozzle vanes. This problem is of paramount importance in

prospective steam and gas turbines that operate at ultrahigh temperatures of the working fluid. However, there is no information in the literature on the effect of the method of nozzle vane cooling on the heterogeneity of the stream behind the blades. The effect of film cooling of the plane lattice of nozzles on the heterogeneity of the high-temperature flow caused by edge wakes behind the lattice is investigated in a two-part study. In the first part, the authors compare the flow heterogeneity behind the lattice with and without cooling. In the second part, the influence of the film cooling system design on the value of the flow heterogeneity is studied. The numerical experiment is carried out in the STAR-CCM + v9.02.005 software environment. The calculations have shown that the method of profile cooling has a significant impact on the heterogeneity of the high-temperature flow. The results obtained can be used to develop advanced designs of steam and gas turbines.

**Keywords:** nozzle vane profile, aerodynamic wake, high-temperature flow, cooling of profiles, mathematical modeling.

Одной из основных задач турбостроения является задача обеспечения надежности турбоагрегатов в течение всего периода эксплуатации. В связи с этим практический интерес представляют исследования влияния типа охлаждения сопловых лопаток перспективных высокотемпературных паро- и газотурбинных двигателей [1–3] на вибрационную надежность лопаток. Следует отметить, что в настоящее время в технической литературе и опубликованных научных работах [4–12] нет сведений по данному вопросу. Известно, что одной из причин колебаний рабочих лопаток являются переменные аэродинамические силы, вызванные неравномерностью\* потока от кромочных следов за сопловыми лопатками. Интенсивность кромочных следов может меняться в зависимости от разных факторов: параметров основного потока, конструктивных особенностей сопловой решетки (угол установки, шаг решетки, тип профиля и т. д.), температуры потока, наличия или отсутствия системы охлаждения лопаток и параметров охладителя. Влияние некоторых из перечисленных факторов на неоднородность потока рассмотрено авторами ранее в других публикациях.

Цель работы — изучение влияния на неоднородность потока одного из типов заградительного охлаждения — пленочного охлаждения сопловых лопаток.

Математическое моделирование процесса обтекания решетки профилей проводили в программной среде STAR-CCM+v9.02.005, позволяющей решать прикладные задачи с высо-

кой степенью точности. В качестве объекта исследований была выбрана решетка полых сопловых профилей С-9022А. Влияние предыдущей рабочей решетки не учитывалось.

*Характеристики модели:*

- количество профилей в решетке 5 шт.;
- длина хорды профиля 45 мм;
- относительный шаг решетки 0,6;
- рабочее тело — воздух.

*Начальные параметры моделирования:*

- полная температура потока  $t_0 = 500, 800$  и  $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- полное давление  $p_n = 101\,325\text{ Па}$ ;
- скорость потока на входе в решетку  $v_0 = 100\text{ м/с}$ ;
- давление окружающей среды (атмосферное)  $p_a = 101\,325\text{ Па}$ ;
- охлаждающая среда — воздух со следующими параметрами:
  - температура  $t_{\text{охл}} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - давление  $p_{\text{охл}} = 101\,425\text{ Па}$ ;
  - скорость охладителя  $v_{\text{охл}} = 100\text{ м/с}$ .

Теплофизические свойства воздуха выбирались программой из стандартной библиотеки, заложенной в нее, и пересчитывались программой в зависимости от конкретных условий в каждой ячейке расчетной сетки.

Математическая модель плоской сопловой решетки профилей показана на рис. 1.

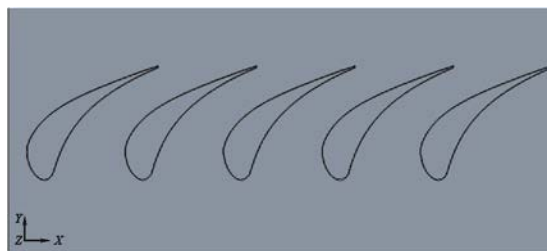


Рис. 1. Модель плоской сопловой решетки профилей С-9022А

\* По отношению к неподвижной сопловой решетке лопаток поток является неоднородным, а по отношению к движущейся рабочей решетке — равномерным.

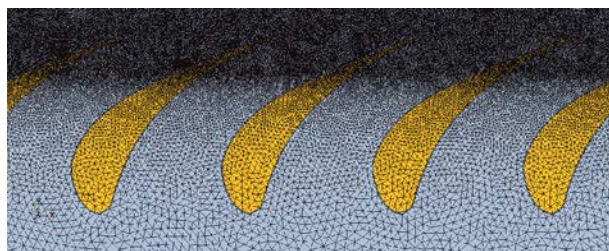


Рис. 2. Расчетная сетка модели

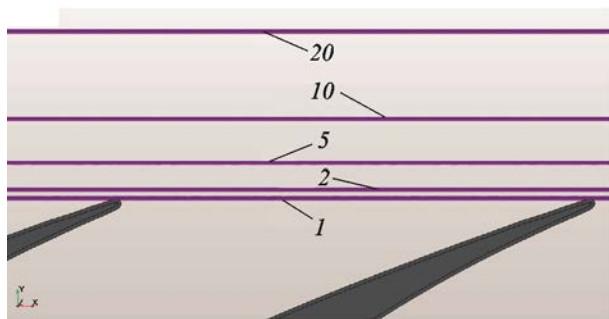


Рис. 3. Линии замера параметров потока в следах

Расчетная сетка модели (рис. 2) содержала порядка 1,5 млн ячеек, причем ближе к выходным кромкам профилей, в области образования аэродинамических следов, сетка сгущалась.

Для численного измерения параметров за выходными кромками профилей было выбрано несколько линий замеров (рис. 3). Каждая линия располагалась на определенном удалении от выходных кромок с шагом 0,5 мм. Например, линия № 1 касалась выходных кромок профилей, линии № 5 и 20 находились на расстоянии

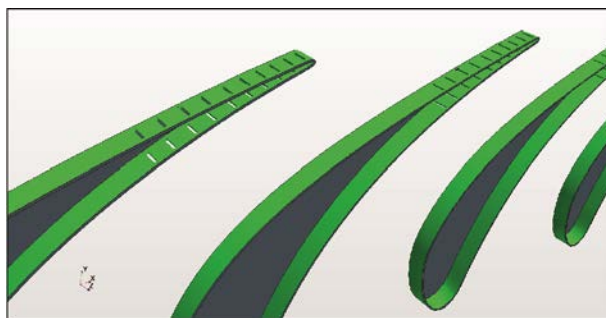
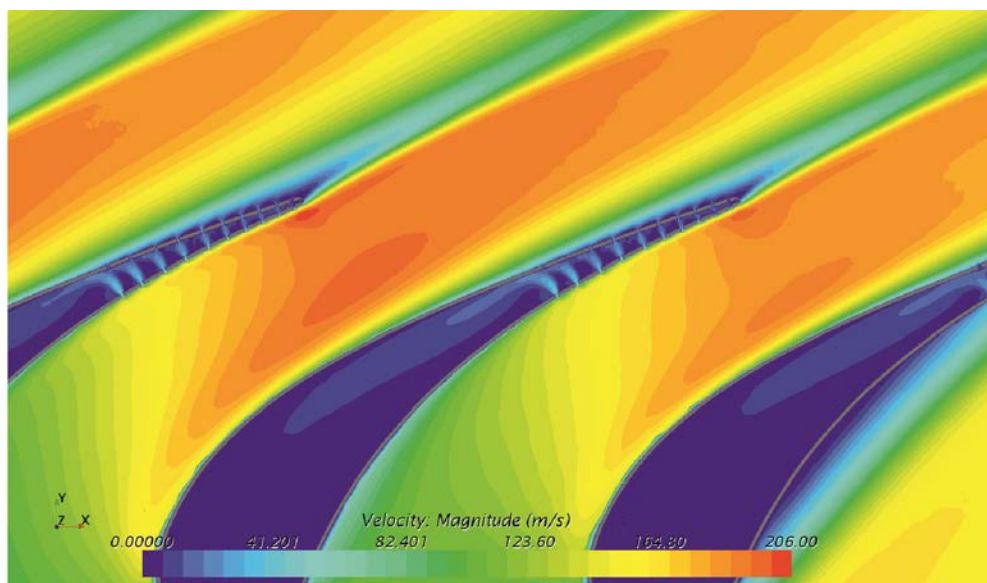


Рис. 4. Каналы для выхода охладителя

соответственно 2,0 и 9,5 мм от решетки, что позволило наиболее полно оценить структуру аэродинамических следов при различных режимах работы и конструктивных вариантах решетки.

Исследование состояло из двух частей. В первой части расчеты проводились для решетки с пленочным охлаждением и без охлаждения (для сравнения). Во второй части рассматривались различные конструктивные варианты пленочного охлаждения. Для этого изменялась система подводящих охладитель каналов, которые представляют собой щели в профиле лопаток (рис. 4).

Охлаждение работает следующим образом. Охладитель подается в полость профиля и затем по щелям выходит в поток. При смешении охладителя с основным потоком образуется относительно холодная пленка вблизи поверхности профиля, что препятствует его перегреву.

Рис. 5. Поле скоростей потока, м/с, при температуре  $t_0 = 500\text{ }^\circ\text{C}$  (без подачи охладителя)

**Исследование неоднородности потока за решеткой сопловых профилей без охлаждения и с охлаждением.** Вначале проводились расчеты без подачи охладителя в полые профили при температуре потока  $t_0 = 500$  °С. Полученное поле скоростей потока показано на рис. 5.

Как видно из рис. 5, основной поток проникает в полости. Это означает, что размер ячеек расчетной сетки выбран правильно. С помощью двадцати линий замеров параметров получены графики скоростей в аэродинамических следах при различном удалении от выходных кромок лопаток (рис. 6).

Из рис. 6 видно, как меняются провалы скоростей от минимальной скорости вблизи выходной кромки (измеренной по линии № 1) до некоего среднего значения скорости вдали от выходной кромки (измеренной по линии № 20), где происходит смещение основного потока и потока в следах за лопатками.

Затем выполнялись расчеты с подачей охладителя в полости профилей при температуре охладителя  $t_{\text{охл}} = 100$  °С и скорости  $v_{\text{охл}} = 100$  м/с. Для удобства отображения рассматривались графики скоростей, полученные на пятой линии замера при температуре основного

потока  $t_0 = 500$  °С и его скорости на входе  $v_0 = 100$  м/с. Результаты расчетов приведены на рис. 7 в режимах с охлаждением лопаток и без охлаждения. В случае охлаждения лопаток предусмотрены щели на спинке профиля и вогнутой части вблизи выходной кромки, а также симметричная щель в выходной кромке профиля.

Далее проводились расчеты с подачей охладителя в полости профилей при температуре основного потока  $t_0 = 800$  и  $1\,000$  °С. Картина принципиально не изменилась — при добавлении охлаждения «провал» скоростей за сопловыми профилями (неоднородность потока) уменьшается. Это объясняется тем, что при наличии охлаждения плотность пограничного слоя в пристеночной области увеличивается, силы трения растут, и частицы слоя затормаживаются.

**Исследование влияния конструкции системы охлаждения (количество и положение щелей в профилях) на неоднородность потока за решеткой.** Расчеты проводились при температурах основного потока  $t_0 = 800$  °С и охладителя  $t_{\text{охл}} = 100$  °С. Канал непосредственно в выход-

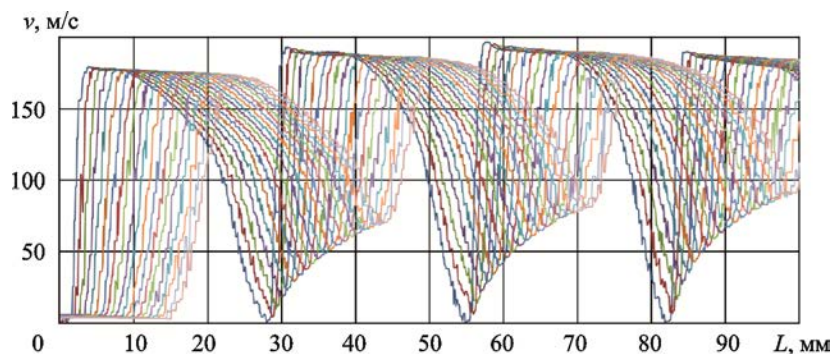


Рис. 6. Изменение скорости потока в аэродинамических следах при различном удалении от выходных кромок профилей

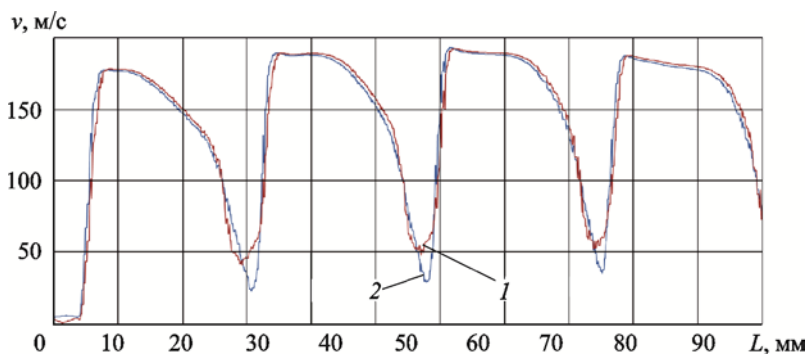


Рис. 7. Изменение скорости потока в аэродинамических следах на линии замера № 5 с охлаждением (1) и без охлаждения (2) профилей



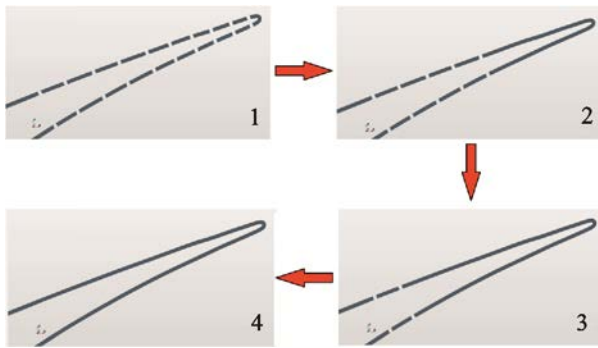


Рис. 8. Изменение конструкции охлаждающих каналов:  
1–4 — варианты конструкции системы охлаждения

ной кромке профиля не выполнялся, так как данное изменение конструкции системы охлаждения практически не оказывало влияния на скорость в аэродинамических следах (это следует из расчетов). Далее конструкцию системы охлаждения меняли, последовательно уменьшая количество охлаждающих щелей вплоть до их отсутствия (рис. 8).

Графики скорости потока в аэродинамических следах при различных вариантах конструкции охлаждающих каналов представлены на рис. 9. Наглядно видно, что с уменьшением

количества щелей снижается неоднородность потока.

При рассмотрении графиков скоростей следует иметь в виду, что по существу здесь сравниваются два типа охлаждения — пленочный (см. рис. 8, варианты 1–3) и конвективный (вариант 4). Графики скоростей показывают, что неоднородность потока, вызванная следами, меньше в случае конвективного охлаждения. Наибольшую неоднородность создает пленочный тип охлаждения с максимальным количеством щелей. Другими словами, «подмешивание» охладителя снижает плотность пристенного слоя, силы трения уменьшаются, частицы пограничного слоя ускоряются.

Оценим влияние температурной составляющей на изменение скорости в аэродинамическом следе. В качестве примера рассмотрим вариант 3 конструкции системы охлаждения (по два канала на спинке и корытце профилей) при температурах основного потока  $t_0 = 800$  °С и охладителя  $t_{\text{охл}} = 100$  и  $700$  °С. Результаты исследования показаны на рис. 10, где видно, что неоднородность потока слабо реагирует на температуру охладителя. Таким образом, при данных параметрах рабочего тела, охладителя и

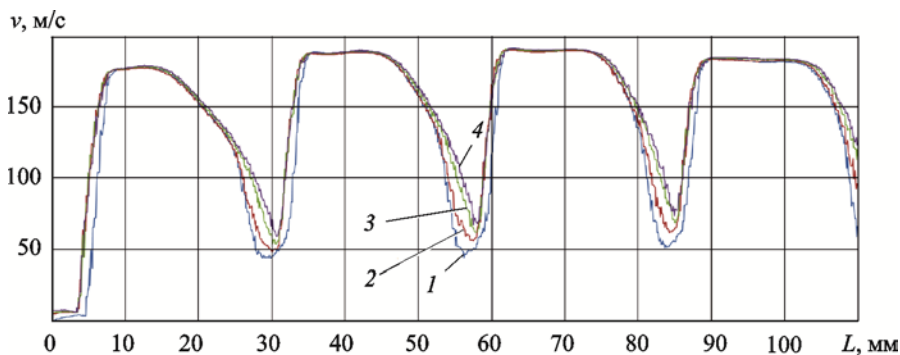


Рис. 9. Изменение скорости потока в аэродинамических следах на линии замера № 5 для различных вариантов конструкции системы охлаждения:  
1 — вариант 1; 2 — вариант 2; 3 — вариант 3; 4 — вариант 4

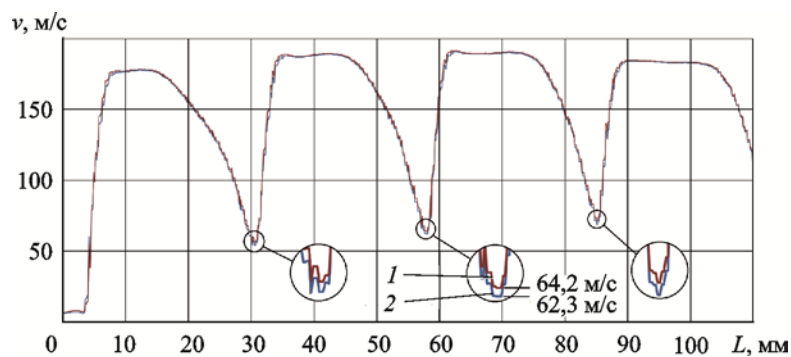


Рис. 10. Изменение скорости потока в аэродинамических следах на линии замера № 5 ( $t_0 = 800$  °С):  
1 —  $t_{\text{охл}} = 700$  °С; 2 —  $t_{\text{охл}} = 100$  °С

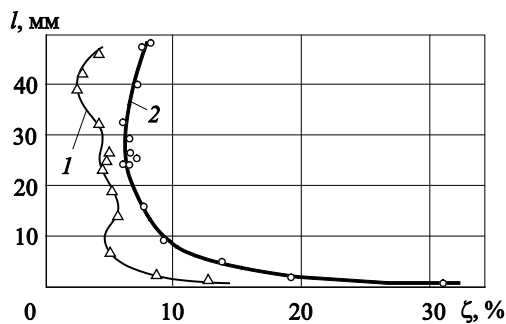


Рис. 11. Сравнение потерь  $\zeta$  по высоте  $l$  сопловой решетки при отсутствии (1) и наличии (2) вращающейся рабочей решетки перед ней

конструкции лопаток изменения скоростей в следе не так существенны, как при изменении конструкции системы охлаждения. Подобная тенденция сохраняется при любых режимах.

В отличие от рассмотренных расчетов в реальной ступени турбины перед сопловой решеткой промежуточной ступени вращается рабочая решетка предыдущей ступени. Поэтому поток, набегающий на сопловую решетку, является неравномерным, турбулентным и периодически нестационарным. Это существенно влияет на ее аэродинамические характеристики и приносит дополнительные потери (увеличивает неоднородность потока за решеткой). Косвенным образом о значении этих потерь в высокотемпературном потоке можно судить по данным работы [13], полученным ранее на экспериментальной турбине (рис. 11). Из графика следует, что по всей высоте сопловой решетки  $l$  профильные потери  $\zeta$  в случае учета предыдущей вращающейся рабочей решетки значительно больше.

При анализе полученных результатов, в основе своей связанных с исследованием возбуждающих сил, возникает вопрос о том, как при расчетах динамических напряжений в реальной рабочей решетке лопаток можно учесть многообразие факторов, влияющих на эти силы в потоке с высокой температурой и охлаждаемой сопловой решеткой. В связи с этим рассмотрим следующие пять безразмерных критериев, определяющих силовое взаимодействие потока и рабочей решетки при моделировании процесса:

## Литература

- [1] Федоров В.А., Мильман О.О., Шифрин Б.А. *Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 116 с.
- [2] Быков Ю.А. Численное моделирование аэроупругости в решетке охлаждаемых лопаток. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2010, № 5 (72), с. 59–63.

$\rho_0 b^2/m$  — относительная плотность рабочего тела;

$v/w_1$  — относительная величина «провала» скорости в следе;

$\omega b/w_1$  — число Струхала;

$f/\lambda$  — относительная частота возмущающей силы;

$\delta$  — коэффициент механического демпфирования,

где  $\rho_0$  — плотность рабочего тела;  $b$  — длина хорды лопатки;  $m$  — масса единицы длины лопатки,  $m = \rho F$  ( $F$  — площадь поперечного сечения лопатки);  $w_1$  — скорость набегающего потока;  $\omega$  — круговая частота колебаний лопатки;  $f$  — частота возмущающей силы;  $\lambda$  — собственная частота колебаний лопатки.

Первый критерий зависит от температуры, так как от нее зависит плотность  $\rho_0$  рабочего тела. Второй критерий определяет неоднородность потока и зависит от температуры и способа охлаждения. Число Струхала также зависит от температуры потока, поскольку круговая частота колебаний лопатки  $\omega$  зависит от модуля упругости  $E$ , а он в свою очередь — от температуры. Таким образом, при расчетах, связанных с силовым взаимодействием потока с высокой температурой и решетки лопаток, нет необходимости учитывать еще один (шестой) безразмерный параметр, определяемый температурой и типом охлаждения. В этом случае надо вводить только поправки на геометрию решеток лопаток, режим работы ступени и наличие (отсутствие) рабочей решетки предыдущей ступени.

## Выводы

1. Пленочное охлаждение профилей сопловых лопаток оказывает существенное влияние на неоднородность высокотемпературного потока.

2. Температурная составляющая в гораздо меньшей степени влияет на неоднородность потока за решеткой, чем газодинамическая.

- [3] Лапин Ю.Д., Поварнев М.В. Проблемы внутреннего охлаждения лопаток высокотемпературной паровой турбины. *Разработка научных основ проектирования электростанций с высокотемпературными паровыми турбинами. Сб. ст.*, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 300 с.
- [4] Лобанов И.Е. Теплообмен при турбулентном течении в плоских каналах с равномерно расположенными поверхностными односторонними турбулизаторами потока. *Вестник машиностроения*, 2012, № 8, с. 13–17.
- [5] Жуков В.А. Комплексный критерий совершенства систем жидкостного охлаждения энергетических установок и технологического оборудования. *Вестник машиностроения*, 2011, № 12, с. 86–89.
- [6] Ванчиков А.В., Ванчиков В.Ц. Использование свойств граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости в технологии машиностроения. *Вестник машиностроения*, 2012, № 3, с. 27–29.
- [7] Афанасьев В.Н., Бурцев С.А., Егоров К.С., Кулагин А.Ю. Цилиндр в пограничном слое плоской пластины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 2, с. 3–22.
- [8] Lerche A., Moore J.J., Feng Y. Computational modeling and validation testing of dynamic blade stresses in a rotating centrifugal compressor using a time domain coupled fluid-structure computational model. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 2010, vol. 6, is. pt. A and B, pp. 799–807.
- [9] Bladh J.R., Castanier M.P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks – Part I: Theoretical Models. *Journal of Engineering for Gas turbines and Power*, 2001, vol. 123, is. 1, pp. 89–99.
- [10] Светлицкий В.А. *Статистическая механика и теория надежности*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 503 с.
- [11] Клименко А.В., Зорин В.М., ред. *Теплоэнергетика и теплотехника: справочник*. Кн. 1. Москва, Изд-во МЭИ, 2000. 507 с.
- [12] Радциг А.Н. *Экспериментальная гидроаэромеханика*. Москва, Изд-во МАИ, 2004. 274 с.
- [13] Полникова Т.В. *Исследование влияния турбулентности, неравномерности и нестационарности на характеристики сопловых решеток*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1977. 195 с.

## References

- [1] Fedorov V.A., Mil'man O.O., Shifrin B.A. *Vysokoeffektivnye tekhnologii proizvodstva elektroenergii s ispol'zovaniem organicheskogo i vodorodnogo topliva* [Highly efficient power generation technology using an organic fuel and hydrogen]. Moscow, Bauman Press, 2007. 116 p.
- [2] Bykov Iu.A. Chislennoe modelirovanie aerouprugosti v reshetke okhlazhdaemykh lopatok [Numerical simulation of aero-elasticity in the lattice cooled blades]. *Aviatsionno-kosmicheskaja tekhnika i tekhnologija* [Aerospace Technic and Technology]. 2010, no. 5(72), pp. 59–63.
- [3] Lapin Iu.D., Povarnev M.V. Problemy vnutrennego okhlazhdeniia lopatok vysokotemperaturnoi parovoi turbiny [Problems internal cooling blades of the high-temperature steam turbine]. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia elektrostantsii s vysokotemperaturnymi parovymi turbinami. Sb. st.* [Development of scientific bases of designing power plants with high-temperature steam turbines. Collection of articles]. Moscow, Bauman Press, 2009. 300 p.
- [4] Lobanov I.E. Теплообмен при турбулентном течении в плоских каналах с равномерно расположенными поверхностными односторонними турбулизаторами потока [The heat transfer at the turbulent flow in two-dimensional channels having equally spaced superficial unidirectional flow energizers]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2012, no. 8, pp. 13–17.
- [5] Zhukov V.A. Improving the liquid-cooling systems of power units and technological equipment. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 12, pp. 1244–1247.

- [6] Vanchikov A.V., Vanchikov V.Ts. Ispol'zovanie svoystv granichnogo sloia вязкой neszhimaемой zhidkosti v tekhnologii mashinostroeniia [The use of the boundary layer of a viscous incompressible fluid in the manufacturing engineering]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2012, no. 3, pp. 27–29.
- [7] Afanas'ev V.N., Burtsev S.A., Egorov K.S., Kulagin A.Iu. Tsilindr v pogranichnom sloe ploskoi plastiny [Cylinder in Boundary Layer of Flat Plate]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2011, no. 2, pp. 3–22.
- [8] Lerche A., Moore J.J., Feng Y. Computational modeling and validation testing of dynamic blade stresses in a rotating centrifugal compressor using a time domain coupled fluid-structure computational model. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 2010, vol. 6, is. pt. A and B, pp. 799–807.
- [9] Bladh J.R., Castanier M.P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks – Part I: Theoretical Models. *Journal of Engineering for Gas turbines and Power*, 2001, vol. 123, is. 1, pp. 89–99.
- [10] Svetlitskii V.A. *Statisticheskaya mekhanika i teoriya nadezhnosti* [Statistical mechanics and the theory of reliability]. Moscow, Bauman Press, 2002. 503 p.
- [11] *Teploenergetika i teplotekhnika: spravochnik. Kn.1* [Thermal Engineering and Heat Engineering: A Guide]. Vol. 1. Ed. Klimenko A.V., Zorin V.M. Moscow, 2000. 507 p.
- [12] Radtsig A.N. *Ekspperimental'naya gidroaeromekhanika* [Experimental fluid mechanics]. Moscow, MAI publ., 2004. 274 p.
- [13] Polnikova T.V. *Issledovanie vliianiia turbulentnosti, neravnomernosti i nestatsionarnosti na kharakteristiki soplovykh reshetok*. Diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of the effect of turbulence, unevenness and unsteadiness on the characteristics of the nozzle arrays. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, MEI publ., 1977. 195 p.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016

## Информация об авторах

**СИДОРОВ Альберт Александрович** (Калуга) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и теплофизика». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 4, e-mail: sidpoll@rambler.ru).

**КИСЕЛЁВ Сергей Викторович** (Калуга) — аспирант кафедры «Тепловые двигатели и теплофизика». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 4, e-mail: SKV1985@yandex.ru).

**ПОЛНИКОВА Татьяна Владимировна** (Калуга) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 4, e-mail: polnikova\_t@rambler.ru).

## Information about the authors

**SIDOROV Albert Aleksandrovich** (Kaluga) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Thermal Engines and Thermal Physics. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenov St., Bldg. 4, e-mail: sidpoll@rambler.ru).

**KISELEV Sergey Victorovich** (Kaluga) — Postgraduate, Department of Thermal Engines and Thermal Physics. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenov St., Bldg. 4, e-mail: SKV1985@yandex.ru).

**POLNIKOVA Tatiana Vladimirovna** (Kaluga) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Graphics. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenov St., Bldg. 4, e-mail: polnikova\_t@rambler.ru).