

in geostationary area]. Available at: <http://lfvn.astro-nomer.ru/report/0000004/p000004.htm> (accessed 1 September 2013).

4. Bulinin U. L., Grechkoseev A. K., Kulkov A. N. Analysis of man-made space pollution and its treat for GEO satellites operation [*Analiz tekhnogennoj zasorionnosti kosmicheskogo pronstranstva i opasnosti etogo faktora dlia funkcionirovaniya KA*]. 18th International Scientific conf. "System analysis, management and navigation". Heads of reports. Evpatoria 2013, Moscow, MAI publishers, p. 20–21.

5. Marareskul D. I., Ermolaev M. V. GEO satellites transition safety control system [*Sistema obespetchenija bezopasnogo upravlenija orbital'nim dvizheniem kosmicheskikh apparatov na geostatsionarnoj orbite*]. Trudy IV vsrossijskoj konferentsii "Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh system (Proc. 4th All-Russian Technol. Symp. "Safety and durability of technical systems"). Krasnojarsk, 2012, vol. 2, p. 118–123.

6. Tikhonov V. I. *Statisticheskaja radiotekhnika* (Statistical radio engineering). Moscow, Soviet Radio, 1966, 680 p.

7. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* (Theoretical basis of radiolocation). Moscow, Soviet Radio, 1970, 560 p.

8. Voskresenskij D. I. et al. *Ustrojstva SVTch i antenni* (Microwave frequency devices and antennas). Moscow, Radio Engineering, 2006, 376 p.

9. Magnetron MI-471. Available at: <http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3705> (accessed 18 August 2013).

10. *Radiolocator razvedki nazemnikh i maloskorostnikh tselej 111L1 "LIS"* [Radar for land and low-speed targets detection 111L1 "LIS"]. Available at: http://www.ust.com.ua/ru/rls/rls_lis1.html (accessed 25 August 2013).

© Ермолаев М. В., Марарескул Д. И., Ислентьев Е. В., Алешечкин А. М., 2013

УДК 532.526.4

ТЕПЛОТДАЧА В КАВЕРНЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ЖРД*

А. А. Зуев, М. И. Толстопятов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dla2011@inbox.ru

Предметом работы является теоретическое исследование течения с учетом теплоотдачи в полости вращения между ротором и статором газовой турбины. Для получения зависимостей, позволяющих производить расчет локального коэффициента теплоотдачи в стенку вращающегося диска (ротора) и неподвижную стенку корпуса (статора) использован метод интегральных соотношений. В результате выполненной работы получены зависимости, реализация которых в программное обеспечение позволит производить расчет тепловых потоков в элементы конструкции осевой газовой турбины. Сравнительный анализ с теориями различных авторов при расчете локального коэффициента теплоотдачи в стенку вращающегося диска дал удовлетворительную сходимость. Сравнительный анализ полученных зависимостей показал больший коэффициент теплоотдачи от вращающегося в каверне потока в стенку статора, нежели ротора.

Ключевые слова: каверна газовой турбины, полость вращения, вращательное течение, уравнение энергии, коэффициент теплоотдачи.

HEAT TRANSFER IN THE CAVITY OF A GAS TURBINE LIQUID ROCKET ENGINE

A. A. Zuev, M. I. Tolstopyatov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: dla2011@inbox.ru

The subject of the study is the theoretical research of the process in consideration with heat emission in the cavity rotation between the rotor and the stator of a gas turbine. For the result of the dependency which allows to make a calculation of the local heat emission coefficient in the wall of a rotation disk (rotor) and the fixed wall of the framework (stator), the method of the integral ratios is used. As a result of the performed work, the dependency has been brought out. Realization of the dependency into the software will make the calculation of the heat currents in the axial elements of the construction of a gas turbine.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.1835.

The comparative analysis with the theories of different authors along with the calculation of the local heat emission coefficient into the wall of the rotation disk has given the satisfactory convergence. The comparative analysis of the dependency showed higher coefficient of the heat emission from a rotating flow in the cavern into the wall of the stator than the rotor did.

Keywords: gas turbine cavity, the cavity of the rotation, the rotational flow, the energy equation, heat transfer coefficient.

При проектировании энергетических установок летательных аппаратов необходимо учитывать большое число факторов, влияющих на надежность и энергоэффективность изделия. Одним из таких факторов являются тепловые потоки, образующиеся в результате теплоотдачи и трения газового потока при течении в газовых магистралях энергоустановок. Неучтенное в расчете тепло при проектировании узлов и агрегатов влияет на теплофизические свойства рабочего тела. Нерасчетные величины вязкости и плотности рабочего тела могут вывести рабочие параметры за предел расчетного объема работы установки, который для получения максимального КПД имеет довольно узкий диапазон величин [1]. Широкая классификация закрученных потоков встречается в энергетических установках летательных аппаратов, это обусловлено интенсивностью протекающих динамических и тепловых процессов. Вращательные и закрученные потоки часто используются для интенсификации теплообмена в различных энергетических установках, в том числе в теплообменных аппаратах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [2; 3]. Вращательное течение также характерно для подводящих и отводящих устройств газовых турбин и насосов ЖРД, полостей между ротором и статором турбин, торцевых щелей между вращающимся диском и корпусом, полостей гидродинамических уплотнений [4]. Актуальность исследования теплоотдачи в кавернах газовых турбин подтверждается многочисленными исследованиями в этом направлении [5–10].

Течение вблизи плоского диска радиусом r , равномерно вращающегося в покоящейся жидкости с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, перпендикулярной к плоскости диска, является одним из примеров точного решения уравнения Навье–Стокса [11].

При рассмотрении течения в полости вращения (каверне) необходимо разделять задачу на течение у вращающегося диска, и течение рабочего тела у неподвижного основания [6]. Для получения аналитического решения теплоотдачи при ламинарном течении потока рабочего тела у вращающегося диска, используется интегральное соотношение уравнения энергии пространственного пограничного слоя, полученное путем интегрирования дифференциального уравнения энергии по толщине пограничного слоя в [12]. Без учета диссипативного члена в правой части соотношение примет вид

$$\frac{1}{H_\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \delta_{t\phi}^{**} + \frac{1}{H_\psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \delta_{t\psi}^{**} + \frac{1}{H_\phi H_\psi} \frac{\partial H_\psi}{\partial \phi} \delta_{t\phi}^{**} + \frac{1}{H_\phi H_\psi} \frac{\partial H_\phi}{\partial \psi} \delta_{t\psi}^{**} = St, \quad (1)$$

где ϕ и ψ – продольная и поперечная координаты; H_ψ и H_ϕ – коэффициенты Ламе; $\delta_{t\psi}^{**}$ – толщина потери энергии в поперечном направлении течения; $\delta_{t\phi}^{**}$ – толщина потери энергии в продольном направлении течения. Толщина потери энергии потока в продольном направлении течения:

$$\delta_{t\phi}^{**} = \int_0^{\delta_t} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) dy. \quad (2)$$

На рис. 1 представлено распределение относительного изменения профиля скорости и температуры в ламинарном пограничном слое для случая $Pr < 1$, что характерно для реальных рабочих тел газовой турбины. Толщина динамического пограничного слоя δ утоплена в толщине температурного пограничного слоя δ_t , T – температура в толщине пограничного слоя; $T_0 \neq$ – температура обтекаемой поверхности, u – скорость в пограничном слое; U – скорость вне пограничного слоя.

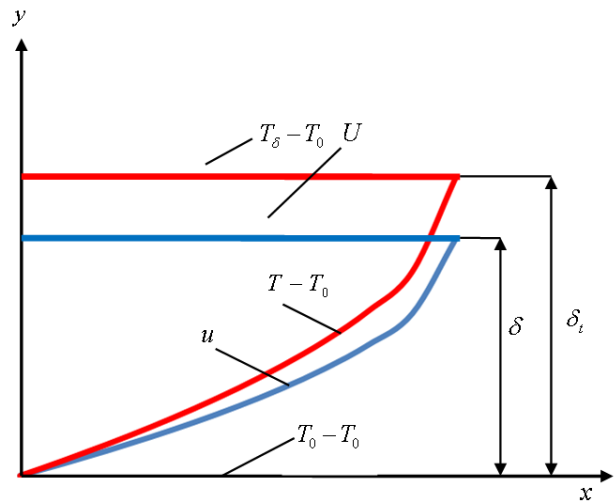


Рис. 1. Распределение профилей скорости и температуры в ламинарном пограничном слое при $Pr < 1$

При определении толщины потери энергии в продольном направлении потока для случая описания безразмерного профиля скорости и температуры используется функция [6; 13]

$$\frac{u}{U} = 1 - \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2; \quad \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} = 1 - \left(1 - \frac{y}{\delta_t} \right)^2. \quad (3)$$

С учетом отношения толщины температурного пограничного слоя к динамическому $\Delta = \delta / \delta_t = Pr^{1/3}$ [14], а также функций (3) получено выражение для

определения толщины потери энергии в продольном направлении

$$\delta_{t\varphi}^{**} = \frac{\delta(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{30\Delta}. \quad (4)$$

При вычислении толщины потери энергии в продольном направлении (2) согласно принятой модели распределения профилей скорости и температуры, пределы интегрирования были разбиты на два участка: от 0 до толщины динамического пограничного слоя δ и от δ до толщины температурного пограничного слоя δ_t .

Закон теплообмена в виде критерия Стантона, входящий в левую часть интегрального соотношения (1), требует определения производной на поверхности теплообмена по функции температуры (3):

$$\left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) \right]_{y=0} = \frac{2}{\delta_t} = \frac{2\Delta}{\delta}. \quad (5)$$

Выразив из (4) толщину динамического пограничного слоя δ и проведя подстановку в (5), закон теплообмена можно записать в виде

$$St = \frac{\lambda}{\rho C_p U} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) \right]_{y=0} = \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15\delta_{t\varphi}^{**} \rho C_p U}. \quad (6)$$

Для перехода к решению задачи конвективного теплообмена при реализации вращательных течений необходимо при рассмотрении интегрального соотношения уравнения энергии (1) перейти к цилиндрическим координатам. Учтем, что при вращательном осесимметричном течении (линия тока – кольцевая линия) : $\varphi = \alpha$; $\psi = R$. Коэффициенты Ламе для цилиндрических координат $H_\varphi = H_\alpha = R$; $H_\psi = H_R = 1$ [15], тогда производная для коэффициентов Ламе определяется как

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} = \frac{\partial H_\alpha}{\partial R} = \frac{\partial R}{\partial R} = 1; \quad \frac{\partial H_\psi}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial \alpha} = 0. \quad (7)$$

С учетом (7) и закона теплообмена в виде критерия Стантона (6) интегральное соотношение (1) уравнения энергии запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial R} \delta_{t\psi}^{**} + \frac{\delta_{t\psi}^{**}}{R} = \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15\delta_{t\varphi}^{**} \rho C_p U}. \quad (8)$$

Для получения аналитического решения соотношения (8) необходимо установить связь между толщиной потери энергии в продольном направлении $\delta_{t\varphi}^{**}$ и входящей в левую часть соотношения толщиной потери энергии в поперечном направлении $\delta_{t\psi}^{**}$. Толщина потери энергии в поперечном направлении в общем виде описывается выражением

$$\delta_{t\psi}^{**} = \int_0^{\delta_t} \frac{w}{U} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) dy. \quad (9)$$

где w – скорость потока в поперечном направлении. Профиль скорости, дающий связь между скоростью

потока в поперечном направлении w и скоростью потока в продольном направлении U , установил Г. Ю. Степанов [16]

$$w = U \varepsilon \frac{u}{U} \left(1 - \left(\frac{u}{U} \right)^3 \right), \quad (10)$$

где ε – тангенс угла скоса донных линий тока. Выражение (9) для толщины потери энергии в поперечном направлении потока с учетом (10) примет вид

$$\delta_{t\psi}^{**} = \int_0^{\delta_t} \varepsilon \frac{u}{U} \left(1 - \left(\frac{u}{U} \right)^3 \right) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) dy. \quad (11)$$

Вычисление (11) производится аналогично (2). После несложных вычислений и преобразований получено выражение для определения толщины потери энергии в поперечном направлении потока:

$$\delta_{t\psi}^{**} = \varepsilon \left(\frac{\delta_t}{3} - \frac{233\delta}{315} + \frac{491\delta^2}{630\delta_t} - \frac{213\delta^3}{770\delta_t^3} \right). \quad (12)$$

Связь между толщиной потери энергии в поперечном направлении $\delta_{t\psi}^{**}$ (12) и толщиной потери энергии в продольном направлении $\delta_{t\varphi}^{**}$ (4) устанавливается путем введения относительной характерной толщины температурного пространственного пограничного слоя I , аналогичное отношение использовано в [16], с учетом $\Delta = \delta / \delta_t = Pr^{1/3}$ имеем:

$$I = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{t\psi}^{**}}{\delta_{t\varphi}^{**}} = \frac{(8,3\Delta^3 - 23,38\Delta^2 + 22,19\Delta - 10)}{(\Delta^3 - 5\Delta^2 + 10\Delta - 10)}. \quad (13)$$

Относительная характерная толщина зависит только от выбранных функций аппроксимирования относительного изменения скорости и температуры в пограничном слое и отношения толщины динамического и температурного пограничных слоев. С учетом относительной характерной толщины (13) интегральное соотношение (7) для течения с ламинарным пограничным слоем можно записать в другом виде:

$$I \varepsilon \frac{\partial}{\partial R} \delta_{t\varphi}^{**} + \frac{I \varepsilon}{R} \delta_{t\varphi}^{**} = \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15\delta_{t\varphi}^{**} \rho C_p U}. \quad (14)$$

Рассмотрим случай вращательного течения газового потока в торцевой щели между ротором и статором лопаточной машины. Известно, что распределение окружной составляющей скорости потока по закону твердого тела характерно для диска, вращающегося в ограниченном пространстве. Аналогичный режим реализуется между вращающимся диском лопаточной машины и неподвижной стенкой корпуса. Согласно закону вращения твердого тела окружная составляющая скорости внешнего потока

$$U = \omega R. \quad (15)$$

С учетом (15) интегральное соотношение уравнения энергии пространственного пограничного слоя (14) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial R} \delta_{t\varphi}^{**} + \frac{\delta_{t\varphi}^{**}}{R} - \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15I \varepsilon \rho C_p \omega} \frac{1}{\delta_{t\varphi}^{**} R} = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) решается как линейное дифференциальное уравнение первого порядка, в результате решения получено выражение для определения толщины потери энергии в продольном направлении потока $\delta_{тф}^{**}$:

$$\delta_{тф}^{**} = \sqrt{\frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15I\epsilon\rho Cp\omega}} \quad (17)$$

С учетом (17) локальный закон теплообмена (6) можно записать в виде пригодном для численного интегрирования по радиусу торцевой щели:

$$St = 0,258 \sqrt{\frac{\lambda\epsilon(23,38Pr^{0,66} - 8,3Pr - 22,19Pr^{0,33} + 10)}{Cp\rho\omega R^2}} \quad (18)$$

Следует отметить, что характер течения у неподвижной стенки (статора) может существенно отличаться от характера течения у вращающегося диска (ротора) [5]. В работе [6] получены выражения для определения величин ϵ – тангенса угла скоса донных линий для случая вращательного течения по закону «твердого тела» над неподвижным основанием (статором), и для случая вращающегося диска (ротора) в потоке, закрученном по закону твердого тела. При преобразовании (18) к критериальному виду учтем, что $Re_\omega = \frac{\rho\omega R^2}{\mu} = \frac{\omega R^2}{\nu}$ и $Pr = \frac{\mu Cp}{\lambda}$; $Nu = St Re Pr$, а также известные значения ϵ – тангенса угла скоса донных линий тока [6]. Локальный коэффициент теплоотдачи в неподвижную стенку (статор) от потока, увлекаемого вращающимся диском

$$Nu = 0,297 Re_\omega^{0,5} Pr^{0,5} \times (23,38Pr^{0,66} - 8,3Pr - 22,19Pr^{0,33} + 10)^{0,5} \quad (19)$$

Локальный коэффициент теплоотдачи в стенку диска, вращающегося в потоке, закрученном по закону твердого тела

$$Nu = 0,23 Re_\omega^{0,5} Pr^{0,5} \times (23,38Pr^{0,66} - 8,3Pr - 22,19Pr^{0,33} + 10)^{0,5} \quad (20)$$

На рис. 2 изображены графические зависимости теорий различных авторов для определения локальных чисел Нуссельта при ламинарном режиме течения в каверне, а также зависимости (19) и (20). Среднее максимальное расхождение зависимости (20) с теориями других авторов при расчете локальной теплоотдачи в стенку вращающегося в каверне диска составляет 0,2 %. Многие авторы рекомендуют при расчете теплоотдачи в неподвижную стенку (статор) использовать зависимости, полученные для случая вращающегося диска. Возможно такой подход применим для случая слившихся пограничных слоев на роторе и статоре. При реализации между пограничными слоями ядра течения, расчет тепловых потоков по зависимости (20) может накладывать существенную ошибку. Среднее максимальное расхождение зависи-

мости (19) с теориями других авторов составляет 20 %, что весьма существенно.

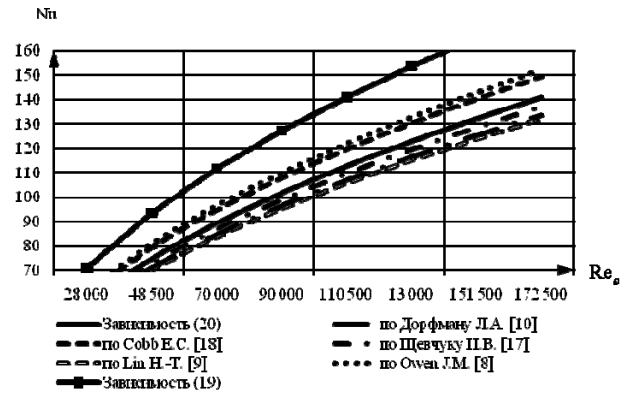


Рис. 2. Сравнение различных теорий для определения локальных чисел Нуссельта при ламинарном режиме течения в каверне газовой турбины

Полученные зависимости применимы для случая вращательного течения в полости между вращающимся диском турбины и корпусом при числах Рейнольдса $Re_\omega \leq 1,8 \cdot 10^5$ [17]. Зависимости применимы для случая, когда ламинарные пограничные слои на статоре и роторе разделяются слоем рабочего тела, в котором влияние вязкости является достаточно малым. Между пограничными слоями находится слой жидкости, который вращается с угловой скоростью, приблизительно равной половине угловой скорости вращения диска [5].

Библиографические ссылки

1. Прямолинейное равномерное течение газов с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов / М. И. Толстопятов, А. А. Зуев, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4(44). С. 134–138.
2. Громько Б. М., Ключева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 1. Кожухотрубчатый испаритель азота двигателя РД107 // Тр. НПО «Энергомаш». 2006. № 24. С. 246–255.
3. Ключева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты – носителя. Ч. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 // Тр. НПО «Энергомаш». № 24 / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. Москва, 2006. 420 с.
4. Зуев А. А., Толстопятов М. И., Жуйков Д. А. Установка для экспериментального исследования теплоотдачи вращательного течения газа // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2(48). С. 189–192.
5. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. М.: Физматлит, 2010. 488 с.
6. Теория пространственного пограничного слоя в гидродинамике турбомашин: монография / А. А. Кишкин, В. П. Назаров, Д. А. Жуйков и др.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 250 с.

7. Shevchuk I. V. Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems. 2009. 235 p. Springer.

8. Owen J. M., Rogers R. H. Flow and heat transfer in rotating disc systems. Rotor-stator systems. Taunton: Research Studies Press, 1989.

9. Lin H.-T., Lin H.-K. Heat transfer from a rotating cone or disk to fluids of any Prandtl number. Int. Comm. Heat and Mass Transfer. 14 N 3. P. 323–332.

10. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М. : Физматгиз, 1960. 260 с.

11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 711 с.

12. Интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя / А. А. Зуев и др. // Вестник Рыбинской гос. авиационной технол. академии 2010. № 2(17). С. 37–42.

13. Кишкин А. А., Мелкозеров М. Г., Зуев А. А. Течение с теплоотдачей в элементах турбомашин и теплоэнергетических устройств: теоретические основы : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 196 с.

14. Четкин А. В., Занемонец Н. А. Теплотехника. М. : Высш. шк., 1986. 344 с.

15. Кочин И. Е., Кибель А. И., Розе М. В. Теоретическая гидромеханика : в 2 ч. Ч. 1. М. : Физматгиз, 1963. 584 с.

16. Степанов Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М. : Физматгиз, 1962. 512 с.

17. Халатов А. А., Авраменко А. А., Щевчук И. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : в 4. т. Т. 2. Вращающиеся системы. 1996. 289 с.

References

1. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4(44), p. 134–138.

2. Gromyko M. B., Klyueva O. G. *Trudy NPO Energomash*. 2006, № 24, p. 246–255.

3. Klyueva O. G. *Trudy NPO Energomash*. 2006, 24, p. 256–271.

4. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4(44), p. 134–138.

5. Volkov K. N., Emel'yanov V. N. *Techeniya i teploobmen v kanalakh i vrashchayushchikhsya polostyah*

(Flow and heat transfer in rotating channels and cavities). Moscow, Fizmatlit, 2010, 488 p.

6. Kishkin A. A., Nazarov V. P., Zhuykov D. A. et al. *Teoriya prostranstvennogo pogrannichnogo sloya v gidrodinamike turbomashin* (Dimensional boundary layer theory in hydrodynamics turbomachinery), monograph. Sib. State. Aerospace. Univ. Krasnoyarsk, 2013, 250 p.

7. Shevchuk I. V. Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems. 2009. 235 p. Springer.

8. Owen J. M., Rogers R. H. Flow and heat transfer in rotating disc systems. Rotor-stator systems. Taunton, Research Studies Press, 1989.

9. Lin H.-T., Lin H.-K. Heat transfer from a rotating cone or disk to fluids of any Prandtl number. Int. Comm. Heat and Mass Transfer. 14 N 3. P. 323–332.

10. Dorfman L. A. *Gidrodinamicheskoe soprotivlenie i teplootdacha vrashchayushchikhsya tel* (Pressure drop and heat transfer of rotating bodies). Moscow, Fizmatgiz, 1960, 260 p.

11. Shlikhting G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* (Boundary-layer theory). Moscow, Nauka, 1974, 711 p.

12. Zuev A. A. et al. *Vestnik Rybinskoy gos. aviatsionnoy tekhnol. akademii imeni P. A. Solov'eva*. 2010. № 2(17), p. 37–42.

13. Kishkin A. A., Melkozerov M. G., Zuev A. A. *Techenie s teplootdachey v elementakh turbomashin i teploenergeticheskikh ustroystv: teoreticheskie osnovy* (Flow with heat transfer elements in the turbomachinery and heat power devices: theoretical foundations), monograph. Sib. State. Aerospace. Univ. Krasnoyarsk, 2010, 196 p.

14. Chechetkin A. V., Zanemonets N. A. *Teplotekhnika* (Thermotechnics). Moscow, Vyssh. shk., 1986, 344 p.

15. Kochin I. E., Kibel A. I., Roze M. V. *Teoreticheskaya gidromekhanika* (Theoretical Hydro-mechanics). Part 1. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 584 p.

16. Stepanov G. *Gidrodinamika reshetok turbomashin* (Hydrodynamics lattices turbomachinery). Moscow, Fizmatgiz, 1962, 512 p.

17. Khalatov A. A., Avramenko A. A., Shchevchuk I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. T. 2. Vrashchayushchiesya sistemy* (Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Vol. 2. Rotating system). 1996, 289 p.

© Зуев А. А., Толстопятов М. И., 2013