

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- ЕНИКЕЕВА С.Р., РАХИМОВ И.К., ЛИВШИЦ С.А., УСАЧЕВ С.С. Математический анализ и моделирование процессов: обоснование итерационного и кубатурного методов решения нелинейного сингулярного интегрального уравнения. 10
- САБИТОВ Л.С., ГАТИЯТОВ И.З., КАШАПОВ Н.Ф. Математическое моделирование узлов соединений опор вл из тонкостенных стержней оболочек закрытого профиля. 16
- ЕНИКЕЕВА С.Р., ЛИВШИЦ С.А., ЮДИНА Н.А., УСАЧЕВ С.С. Использование метода наименьших квадратов в слабо сингулярных интегральных уравнениях для решения задач естественно-научной и экономической области знаний. 27

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- ГУБАЕВ Т.О., ПЕТРОВА Н.К. Разработка синтаксического анализатора арифметических выражений на языке C++. 32

ЭНЕРГЕТИКА

- АХМЕТШИНА А.И., ПАВЛОВ Г.И., НАКОРЯКОВ П.В. Экспериментально-теоретические исследования газодинамических и турбулентных характеристик воздушного потока в слоевой топке с вихревым движением газовой смеси. 41
- ДМИТРИЕВ А.В., КРУГЛОВ Л.В., ХАФИЗОВА А.И., ДМИТРИЕВА О.С., ШЕШУКОВ Е.Г. Методика расчета гидравлического сопротивления струйно-пленочных контактных устройств в теплоэнергетическом оборудовании. 53
- ЕГОРОВ А.Н., СЕМЁНОВ А.С., ФЕДОРОВ О.В., ХАРИТОНОВ Я.С. Анализ энергоэффективности главной вентиляторной установки рудника по добыче алмазосодержащих пород. 60
- КОСТЫЛЕВА Е.Е., ЗАМАЛИЕВ А.Н., ТАЗЕЕВ И.Р. Термическая сушка, как способ повышения эффективности процесса сжигания илового осадка. 73
- БУСЛАЕВ Е.С., МУТУГУЛЛИНА И.А. Рациональное использование водных ресурсов при разработке месторождений сверхвязкой нефти. 81

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- УСАНОВА Е.В. Дидактические средства и подходы базовой геометрико-графической подготовки в контексте концепции параллельного инжиниринга. 88
- ИСАЕВА Л.Б., САБИТОВА Р.Р. Самостоятельная работа иностранных студентов в иноязычной образовательной среде: междисциплинарный MOODLE-курс. 100

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

- ЖИЛКИНА Ю.В. Развитие электроэнергетики: вертикальная интеграция или дальнейшая либерализация отрасли? 106

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

- Водно-энергетический форум-2018. 114
- ЭЭГМ 2018. 116

© А.В. Дмитриев, Л.В. Круглов, А.И. Хафизова, О.С. Дмитриева, Е.Г. Шешуков

УДК 66.045.53

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТРУЙНО-ПЛЕНОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

А.В. Дмитриев*, Л.В. Круглов, А.И. Хафизова, О.С. Дмитриева, Е.Г. Шешуков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Резюме: Гидравлическое сопротивление является одним из основных показателей эффективности контактного устройства в теплоэнергетическом оборудовании. В статье рассматриваются способы определения гидравлического сопротивления струйно-плёночного контактного устройства. Определяется возможность расчёта сопротивления без использования программных пакетов.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, контактное устройство, градирня, потери давления.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по договору от 02 декабря 2015 г. № 31 16-38-60081/15 в рамках проекта РФФИ № 16-38-60081 мол_а_дк «Исследование взаимодействия жидкости и газа в теплообменниках аппаратах со струйно-барботажными контактными устройствами».

METHOD OF CALCULATION OF THE HYDRAULIC RESISTANCE OF JET-FILM CONTACT DEVICES IN HEAT POWER EQUIPMENT

A.V. Dmitriev*, L.V. Kruglov, A.I. Khafizova, O.S. Dmitrieva, E.G. Sheshukov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Abstract: The hydraulic resistance is one of the main indicators of the effectiveness of the contact device in heat power equipment. The article is discussed ways of determining the hydraulic resistance of jet-film contact device. Determine whether calculation of resistance without the use of software packages.

Keywords: hydraulic resistance, contact device, cooling tower, pressure loss.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-38-60081 mol_a_dk (contract No. 31 16-38-60081/15 of 2 December 2015).

Для поддержания регламентированного температурного режима в технологических процессах теплоэнергетических установок, как правило, требуется отведение образующегося низкопотенциального тепла от аппаратов и оборудования. Для этого используются градирни, в которых происходит охлаждение оборотной воды, циркулирующей по замкнутому контуру. Наиболее эффективными и экономичными считаются вентиляторные градирни. Важным показателем вентиляторных градирен

являются общие энергетические затраты в процессе их эксплуатации, суммарная величина которых определяется затратами на организацию воздушного потока, разбрызгивание жидкости и преодоление гидравлического сопротивления оросителя [1-3].

Основным конструктивным элементом градирни, определяющим ее охлаждающую способность, является ороситель – насадка, в объеме которого происходит гидравлическое взаимодействие жидкой и газовой фаз [4]. В настоящее время разработано огромное количество конструкций оросителей градирен, но и они имеют ряд недостатков: сложность в изготовлении конструкции, плохая смачиваемость поверхности аппарата, малая удельная площадь поверхности контакта [5, 6].

Наибольшие затраты энергии при эксплуатации градирен приходятся на долю гидравлического сопротивления орошаемой насадки, в связи с этим возникает необходимость создания новых высокоэффективных и технологичных конструкций оросителей, в которых высокие значения коэффициентов тепло- и массопереноса при испарительном охлаждении воды можно получить при использовании насадки, обладающей малым гидравлическим сопротивлением [3, 7].

В результате исследований выявлено, что наиболее высокий эффект охлаждения обеспечивает пленочный ороситель за счет малого сопротивления движению воздуха, меньших энергетических затрат, малого капельного уноса, по сравнению с капельным оросителем [8].

Об энергетических затратах устройства можно судить по ее гидравлическому сопротивлению при продувке воздухом без орошения жидкостью. Такую насадку принято называть сухой [9]. Гидравлическое сопротивление сухой насадки в зависимости от конструктивных особенностей каждого оросителя определяется экспериментально.

Потери давления по высоте можно вычислить, используя формулу Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p = \zeta \frac{H}{b} \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1)$$

где ζ – безразмерный коэффициент местного сопротивления; H – высота устройства, м; b – сторона основания сливного стакана контактного устройства, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; w – скорость потока воздуха, м²/с.

Авторами было сделано предположение о том, что гидравлическое сопротивление струйно-пленочных контактных устройств возможно, с достаточной точностью для предварительных расчетов, определить без применения программных пакетов. Конструкция струйно-пленочных контактных устройств подробно рассмотрена в работе [10]. Расчеты проводились на основе формул, представленных в справочнике [11].

Если рассмотреть конструкцию струйно-пленочных контактных устройств как совокупность расширений и сужений, то коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении рассчитывается по формуле:

$$\zeta_{pp} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2, \quad (2)$$

где $S_1 = b^2$, $S_2 = 2b^2$ – площадь сечения контактного устройства в сужении и в расширении, соответственно, м².

Коэффициент местного сопротивления при резком сужении:

$$\zeta_{pc} = 0,5 \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right). \quad (3)$$

Таким образом, для предлагаемых струйно-пленочных контактных устройств можно записать $\zeta_{pp} = \zeta_{pc} = 0,25$.

Потери давления на выбранном участке конструкции можно определить:

$$\Delta p = \zeta_m \frac{\rho w^2}{2} n + \rho g H, \quad (4)$$

где $\zeta_m = \zeta_{pp} + \zeta_{pc} = 0,5$; n – число сужений и расширений на участке конструкции высотой H ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Коэффициент сопротивления участка струйно-пленочного контактного устройства высотой H определится:

$$\zeta_1 = b \left(\frac{n}{2H} + \frac{2g}{w^2} \right). \quad (5)$$

Расчеты показали, что максимальная погрешность в модели совокупности сужений и расширений составляет 19,8%, средняя – 10,4%. Сравнительный график между численным экспериментом и расчетными данными показан на рис. 1.

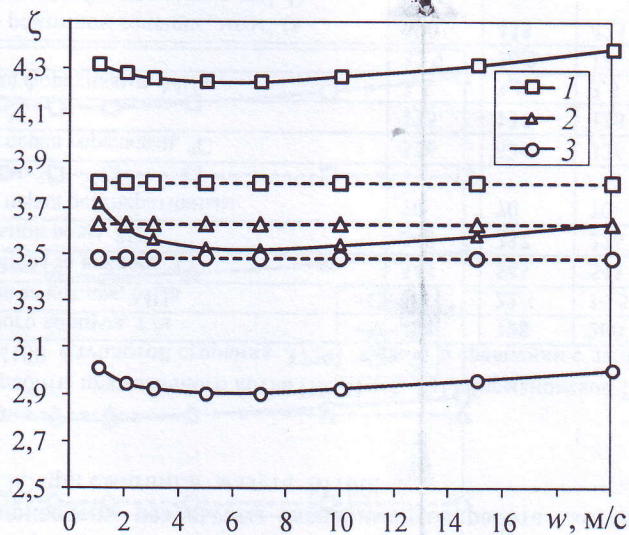


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости на входе в модели совокупности сужений и расширений при $b = 0,1$ м; H , м: 1 – 0,325; 2 – 0,30; 3 – 0,395; высота вертикальной стенки сливного стакана h_1 , м: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03. Значения, полученные при моделировании потока в программном комплексе, обозначены на рисунке сплошными линиями; данные, полученные после расчетов – штриховые

Рассмотрим конструкцию как совокупность поворотов на 180° . При повороте потока на 180° коэффициент местного сопротивления трубы определяется по формуле:

$$\zeta_m = A_1 B_1 C_1, \quad (6)$$

где $A_1 = \left(0,7 + 0,35 \frac{\alpha}{90} \right)$ – коэффициент, учитывающий влияние угла δ изогнутости отвода;

$\alpha = 180^\circ$; $B_1 = 0,21 \left(\frac{4h}{b+h_1} \right)^{2,5}$ – коэффициент, учитывающий влияние относительного

радиуса закругления отвода; C_1 – коэффициент, учитывающий влияние относительной вытянутости поперечного сечения отвода, при круглом сечении $C_1 = 1$; h – расстояние между ступенями струйно-пленочного контактного устройства, м; h_1 – высота вертикальной стенки сливного стакана, м.

Коэффициент сопротивления при повороте на 180° для рассматриваемой конструкции:

$$\zeta_m = 0,0294 \left(\frac{4h}{b+h_1} \right)^{2,5} \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления участка струйно-пленочного контактного устройства высотой H находим по формуле:

$$\zeta_2 = b \left(0,0294 \left(\frac{4h}{b+h_1} \right)^{2,5} \frac{n}{H} + \frac{2g}{w^2} \right), \quad (8)$$

где n – число поворотов на 180° на участке конструкции высотой H .

Расчеты показали, что максимальная погрешность в модели совокупности поворотов составляет 21%, средняя – 13%. Сравнительный график между численным экспериментом и расчетными данными показан на рис. 2.

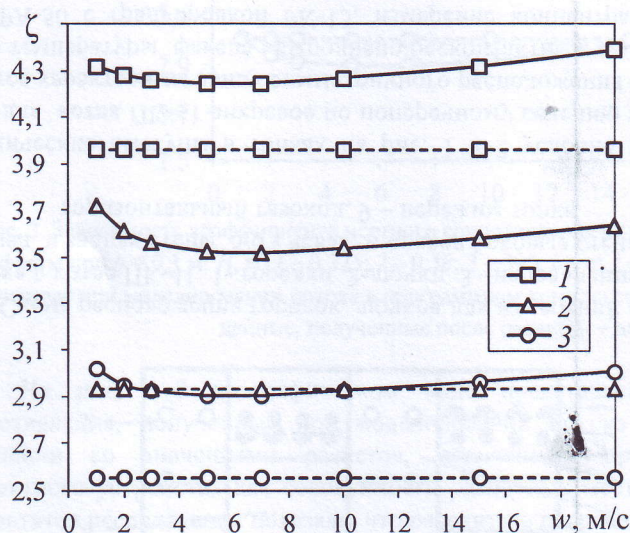


Рис. 2. Зависимость коэффициента местного сопротивления от скорости в модели совокупности поворотов при $b = 0,1$ м; H , м: 1 – 0,325; 2 – 0,36; 3 – 0,395; h_1 , м: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03. Значения, полученные при моделировании потока в программном комплексе, обозначены на рисунке сплошными линиями; данные, полученные после расчетов – штриховые

При представлении конструкции как совокупности диафрагм, коэффициент сопротивления одной ступени может быть определен по формуле:

$$\zeta_m = \varphi \left(\frac{1}{2} \right)^{0,75} + \left(\frac{1}{2} \right)^2 + 2\varphi^{0,5} \tau \left(\frac{1}{2} \right)^{1,375} + \frac{\lambda}{b}, \quad (9)$$

где $\varphi = 0,03 + 0,47 \exp(-17,73 h/b)$; $\tau = 10^{-\delta} (2,4 - h/b)$; $\delta = 0,25 + \frac{0,535(h/b)^8}{0,05 + (h/b)^7}$.

Тогда коэффициент сопротивления участка струйно-пленочного контактного устройства высотой H находим по формуле:

$$\zeta_3 = b \left(\zeta_m \frac{n}{H} + \frac{2g}{w^2} \right). \quad (10)$$

Расчеты показали, что максимальная погрешность в модели совокупности диафрагм составляет 11%, средняя – 5,4%. Сравнительный график между численным экспериментом и расчетными данными показан на рис. 3.

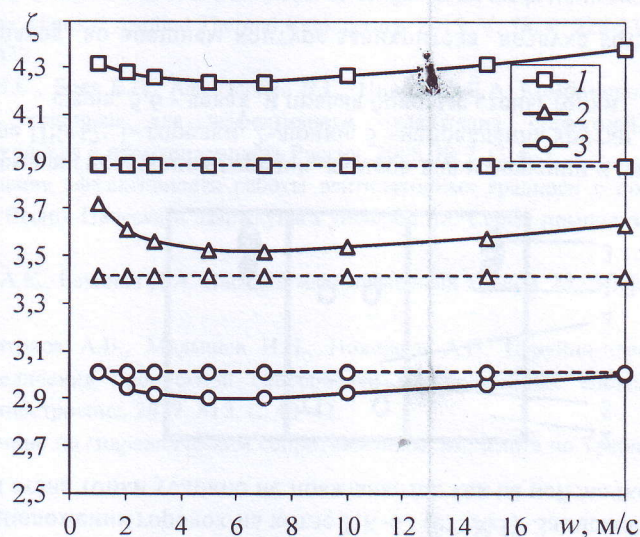


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного сопротивления от скорости в модели совокупности диафрагм при $b = 0,1$ м; H , м: 1 – 0,325; 2 – 0,36; 3 – 395; h_1 , м: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03. Значения, полученные при моделировании потока в программном комплексе, обозначены сплошными линиями; данные, полученные после расчетов – штриховые

На рис. 1–3 в графическом виде представлены значения гидравлического сопротивления, полученные при моделировании потока в программном комплексе, в сравнении со значениями расчетов, полученных при рассмотрении конструкции контактного устройства как совокупности различных местных сопротивлений. Сравнение результатов исследования показало, что рассчитать гидравлическое сопротивление струйно-пленочного контактного устройства возможно без использования трехмерного моделирования в программных пакетах. Конструкцию можно рассматривать как совокупность диафрагм, так как отклонение в этом случае не превышает 11%, что вполне приемлемо для предварительного расчета. Представленная методика расчета будет полезна для определения конструктивных размеров струйно-пленочных контактных устройств при трехмерном моделировании.

Литература

1. Бондарь К.Е., Иванов С.П., Сулейманов Д.Ф., Варисова Р.Р. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в малогабаритных аппаратах охлаждения оборотной воды // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-1. С. 25–29.
2. Zunaida M., Murtaza Q., Gautam S. Energy and performance analysis of multi droplets shower cooling tower at different inlet water temperature for air cooling application // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 121. P. 1070-1079. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.157
3. Меренцов Н.А., Балашов В.А., Орлянкина Я.А. Критериальное уравнение для расчета гидравлического сопротивления сухой насадки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 1(104). С. 112–114.
4. Киркор А.В., Носиков А.А. Аэродинамическое сопротивление оросителя вентиляторных градирен // Вестник Международной академии холода. 2007. № 4. С. 27–29.

5. Bahadori A. Essentials of Oil and Gas Utilities. Process Design, Equipment, and Operations. Chapter 5 – Cooling tower and cooling water circuits. Lismore: NSW, 2016. P. 159-192. DOI: 10.1016/B978-0-12-803088-2.00005-5

6. Ning T., Chong D., Jia M., Wang J., Yan J. Experimental investigation on the performance of wet cooling towers with defects in power plants // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 78. P. 228-235. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.032

7. Иванов С.П., Шулаев Н.С., Боев Е.В., Афанасенко В.Г., Николаев Е.А. Комбинированный капельно-пленочный ороситель градилен для эффективного охлаждения оборотной воды промышленных предприятий // Экология и промышленность России. 2008. № 7. С. 4–5.

8. Меженная О.Б. Повышение эффективности работы вентиляторных градилен с помощью многоступенчатых водосливов // Вестник Палесскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. 2009. № 1. С. 60–67.

9. Сокол Б.А., Чернышов А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. М.: ИнфоХИМ. 2009. 358 с.

10. Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Николаев А.Н. Струйно-пленочные контактные устройства для увеличения пропускной способности массообменных аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 2. С. 40–42.

11. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Книга по Требованию, 2012. 466 с.

Авторы публикации

Дмитриев Андрей Владимирович – докт. техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Круглов Леонид Вадимович – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Хафизова Алия Ильгизаровна – магистрант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шешуков Евгений Геннадьевич – докт. ф.-м. наук, старший научный сотрудник кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Bondar' K.E., Ivanov S.P., Sulejmanov D.F., Varisova R.R. Povysenie ehffektivnosti teplomassooobmennyyh processov v malogabaritnyh apparatah ohlazhdeniya oborotnoj vody [Increase in the efficiency of heat and mass exchange processes in small-size circulating water coolers] // Fundamental'nye issledovaniya. 2017. issue 9-1. pp. 25-29.

2. Zunaida M., Murtaza Q., Gautam S. Energy and performance analysis of multi droplets shower cooling tower at different inlet water temperature for air cooling application // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 121. P. 1070-1079. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.157

3. Merencov N.A., Balashov V.A., Orlyankina YA.A. Kriterial'noe uravnenie dlya rascheta gidravlicheskogo soprotivleniya suhoj nasadki [Criteria equation for calculating the hydraulic resistance of a dry nozzle] // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. issue 1(104). pp. 112–114.

© А.В. Дмитриев, Л.В. Круглов, А.И. Хафизова, О.С. Дмитриева, Е.Г. Шешуков

4. Kirkor A.V., Nosikov A.A. Aerodinamicheskoe soprotivlenie orositelya ventilyatornyh gradiren [Aerodynamic resistance of the cooling tower sprinkler] // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2007. issue 4. pp. 27–29.

5. Bahadori A. Essentials of Oil and Gas Utilities. Process Design, Equipment, and Operations. Chapter 5 – Cooling tower and cooling water circuits. Lismore: NSW, 2016. P. 159-192. DOI: 10.1016/B978-0-12-803088-2.00005-5

6. Ning T., Chong D., Jia M., Wang J., Yan J. Experimental investigation on the performance of wet cooling towers with defects in power plants // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 78. P. 228-235. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.032

7. Ivanov S.P., SHulaev N.S., Boev E.V., Afanasenko V.G., Nikolaev E.A. Kombinirovannyj kapel'no-plenochnyj orositel' gradiren dlya ehffektivnogo ohlazhdeniya oborotnoj vody promyshlennyh predpriyatij [Combined drip-film cooling towers for efficient cooling of circulating water of industrial enterprises] // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2008. issue 7. pp. 4–5.

8. Mezhenaya O.B. Povyshenie ehffektivnosti raboty pp ventilyatornyh gradiren s pomoshch'yu mnogostupenchatykh vodoslivov [Increasing the efficiency of fan cooling towers using multi-stage weirs] // Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk. 2009. issue 1. pp. 60–67.

9. Sokol B.A., Chernyshov A.K., Baranov D.A. Nasadki massoobmennyyh kolonn [Nozzles for mass exchange columns]. Moscow: InfoHIM. 2009. 358 p.

10. Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Nikolaev A.N. Strujno-plenochnye kontaktnye ustrojstva dlya uvelicheniya propusknnoj sposobnosti massoobmennyyh apparatov [Flow Dynamics of Mass Exchangers with Jet-Bubbling Contact Devices] // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2017. issue 2. pp. 40–42.

11. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Reference book on hydraulic resistance]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2012. 466 p.

Authors of the publication

Andrey V. Dmitriev – doc. sci. (techn.), head of the Department «Theoretical Foundations of Thermal Engineering», Kazan State Power Engineering University.

Leonid V. Kruglov – senior lecturer, Department «Theoretical Foundations of Thermal Engineering», Kazan State Power Engineering University.

Alia I. Khafizova – graduate student of Kazan State Power Engineering University.

Oksana S. Dmitrieva – cand. sci. (techn.), senior researcher, Department «Theoretical Foundations of Thermal Engineering», Kazan State Power Engineering University.

Evgenij G. SHeshukov – doc. sci. (Phys.-Math.), senior researcher, Department «Power Engineering» Kazan State Power Engineering University.

Дата поступления 18.01.2018