

УДК 621.51

Сравнительный анализ методов расчета процесса теплообмена в ступенях компрессоров объемного принципа действия

Д-р. техн. наук И. К. ПРИЛУЦКИЙ, канд. техн. наук Ю. И. МОЛОДОВА,

канд. техн. наук Ю. В. ТАТАРЕНКО

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

E-mail: vka@mail.ru

Еще в XX веке учеными предлагались различные методики для расчета коэффициента теплоотдачи, но, в основном, они относились к двигателям внутреннего сгорания. В настоящей работе представлен уточненный расчет коэффициента теплоотдачи применительно к компрессорному процессу, протекающему в цилиндре поршневого компрессора с линейным приводом. Проведено сравнение различных методик расчета коэффициента теплоотдачи. Предлагаемая авторами методика реализована в пакетном продукте КОМДЕТ-ВКА-2021. Полученные результаты выявили, что при расчете по другим методикам не учитывается влияние характерной скорости в процессе всасывания газа в цилиндре поршневого компрессора. Следует отметить, что наиболее близкий результат относительно «методики КОМДЕТ-ВКА-2021» получен согласно формуле Г. Эйхельберга, но и в этом варианте отсутствует учет характерной скорости в процессе всасывания. Результаты исследования показывают, что учет скорости движения газа в цилиндре приводит к более точному определению коэффициента теплоотдачи в цилиндре поршневого компрессора с линейным приводом, что далее сказывается при определении других характеристик компрессора.

Ключевые слова: теплообмен, коэффициент теплоотдачи, Восни, Эйхельберг, поршневой компрессор, численный анализ.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 03.10.2022, одобрена после рецензирования 20.10.2022, принята к печати 10.11.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-15-20

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Прилуккий И. К., Молодова Ю. И., Татаренко Ю. В. Сравнительный анализ методов расчета процесса теплообмена в ступенях компрессоров объемного принципа действия // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 15–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-15-20

Comparative analysis of methods for calculating heat transfer process in the compressor stages of volumetric operating principle

D. Sc. I. K. PRILUTSKIY, Ph. D. Ju. I. MOLODOVA, Ph. D. I. V. TATARENKO

A. F. Mozhaysky Military-Space Academy

E-mail: vka@mail.ru

Back in the 20th century, scientists proposed various methods for calculating the heat transfer coefficient, but, basically, they related to internal combustion engines. This paper presents an updated calculation of the heat transfer coefficient in relation to the compressor process occurring in the cylinder of a piston compressor with a linear drive. A comparison of various methods for calculating the heat transfer coefficient is carried out. The methodology proposed by the authors is implemented in the KOMDET-VKA-2021 package product. The obtained results revealed that, when calculating by other methods, the influence of the characteristic velocity in the process of gas suction into the reciprocating compressor cylinder is not taken into account. It should be noted that the closest result with respect to the KOMDET-VKA method was obtained according to the Eichelberg formula, but even in this variant, the characteristic velocity in the suction process is not taken into account. The results of the study show that taking into account the speed of gas movement in the cylinder leads to a more accurate determination of the heat transfer coefficient in the cylinder of a piston compressor with a linear drive, which further affects the determining other characteristics of the compressor.

Keywords: heat transfer, heat transfer coefficient, Woschni, Eichelberg, reciprocating compressor, numerical analysis.

Article info:

Received 03/10/2022, approved after reviewing 20/10/2022, accepted 10/11/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-15-20

Article in Russian

For citation:

Prilutskiy I. K., Molodova Ju. I., Tatarenko I. V. Comparative analysis of methods for calculating heat transfer process in the compressor stages of volumetric operating principle. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. 15–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-15-20

Введение

При решении различных задач, связанных с процессами теплообмена между поверхностью тела и омывающей средой исследователи сталкиваются с вопросами определения коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи. Одна из таких задач — это определение значений параметров в цилиндре и в компрессорном процессе поршневого компрессора.

В 1923 г. основу первоначальных моделей определения коэффициентов предложил В. Нуссельт [1]. Модель Нуссельта была развита Г. Эйхельбергом [2], но трудности с масштабированием привели к идею безразмерных моделей, которыми занимались, начиная с 1961 г., ученые В. Аннонд и Г. Вошни [3, 4]. Р. Эдайер и др. [5] исследовали конвективный теплообмен в камерах поршневых компрессоров и двигателей. В своей работе они смогли адаптировать безразмерную модель к работе компрессора, а не двигателя внутреннего сгорания. Чонг М. и Уотсон Х. представили в статье [6] математическую модель для прогнозирования параметров теплопередачи и изменения давления в цилиндрах воздушных поршневых компрессоров с учетом влияния скорости вращения коленчатого вала компрессора. Полученные значения согласовывались с экспериментальными данными с точностью $\pm 2\%$.

Керибар Р. и Морель Т. [7] разработали новый подход к расчету теплопередачи газа к стенке цилиндра на основе скоростей потока в цилиндре. Они предложили прогнозирование параметров теплопередачи в компрессорах в зависимости от скорости, степени сжатия, свойств рабочего вещества, геометрии поршня и клапанов поршневого компрессора.

Лю Р. и Чоу З. [8] рассматривали распределение температуры на стенке цилиндра холодильного поршневого компрессора и значения коэффициента теплопередачи между стенкой цилиндра и газообразным хладагентом при различных соотношениях давления, скоростей вращения и температурах всасывания. Переира И. и др. [9] применив в расчетах численный анализ нестационарной теплопередачи в цилиндре поршневого компрессора с учетом параметров эксплуатации выявили, что на теплопередачу сильно влияют процессы всасывания и нагнетания. Тан К. и др. [10] провели теоретическое исследование конвективного теплообмена для новой конструкции компрессора. Благодаря исследованию, им удалось повысить точность математических расчетов при проектировании рассматриваемого типа компрессора. Исследователи [11] применили трехмерную модель конечных элементов для исследования процесса теплопередачи в цилиндре компрессора при сжатии отпарного газа. Установлено, что колебания темпе-

ратуры проходили только на внутренней поверхности цилиндра. Авторы в работе [12] представили модель теплообмена, которая позволяет использовать любую формулу для расчета теплопередачи. Модель может быть совмещена со стандартным «пакетом» для определения температуры стенок цилиндра, в основе которого лежит метод конечных элементов. Авторами проведено сравнение расчета коэффициента теплоотдачи двигателя внутреннего сгорания используя как формулу Вонни, так и модернизированную формулу Вонни (без учета завихрений). Установлено, что пользователь может влиять на значение коэффициента теплопередачи при помощи двух параметров — множителя излучения и множителя конвекции. Кабановым А. Н. [13] проведен анализ применимости различных α -формул, используемых при расчете процесса теплоотдачи в двигателях внутреннего сгорания.

В настоящей работе рассматривается влияние методики расчета коэффициента теплоотдачи на характеристики одного из перспективных типов компрессоров — поршневого компрессора с линейным приводом.

Объект исследования

Численное исследование проведено на примере работы первой ступени воздушного компрессора с линейным приводом и с заданными геометрическими и режимными параметрами [14]. Конструктивное решение представлено на рис. 1. Сопутствующими задачами при численном исследовании являлось нужное сочетание шага расчета и числа итераций, оптимальное значение которых определяло бы минимальное время расчета программы КОМДЕТ-ВКА при допустимой погрешности $\Delta \leq 1\%$ [15, 16].

В последней версии программы КОМДЕТ-ВКА-2021 текущий коэффициент теплоотдачи рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{F\phi} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{экв}}, \quad (1)$$

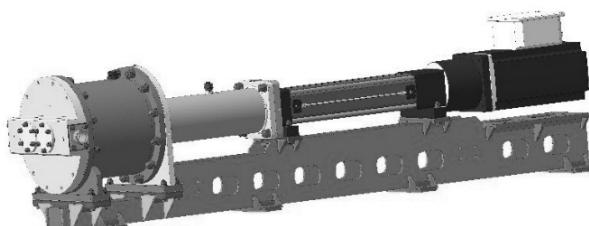


Рис. 1. Конструкция ступени поршневого компрессора с линейным приводом

Fig. 1. A stage of a piston compressor with linear drive

где Nu — критерий Нуссельта; λ — коэффициент теплопроводности сжимаемого рабочего вещества; $D_{\text{экв}}$ — эквивалентный линейный размер (диаметр цилиндра ступени).

Прилуцким И. К. было предложено определение критерия Нуссельта для компрессорных ступеней [17], как:

$$Nu = A_{\text{ПК}} \text{Re}^x = \sqrt{\frac{\rho_{\text{вс.}I}}{\rho_{\text{вс.}i}}} \text{Re}^{0,6}, \quad (2)$$

где Re — критерий Рейнольдса; x — эмпирический коэффициент, полученный в результате экспериментальных исследований; $\rho_{\text{вс.}I}$ — плотность рабочего вещества на входе в I-ю ступень; $\rho_{\text{вс.}i}$ — плотность рабочего вещества на входе в i -ю ступень.

Критерий Рейнольдса определяется выражением:

$$\text{Re} = \frac{w D_{\text{экв}} \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где w — характеристическая скорость газа в полости сжатия компрессора, которая представлена на рис. 2; ρ — плотность газа в полости сжатия; μ — коэффициент динамической вязкости газа.

После совместного решения уравнений (1-3) и ряда упрощений была получена формула для расчета коэффициента теплоотдачи в цилиндре поршневого компрессора с линейным приводом с учетом текущего по времени и осредненное по текущей поверхности теплообмена:

$$\alpha_{F\phi} = \left[\frac{\lambda}{D_{\text{экв}}} A_{\text{ПК}} \left(\frac{w D_{\text{экв}} \rho}{\mu} \right)^{0,6} \right] = \\ = \left[\frac{\lambda}{D_{\text{экв}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{вс.}I}}{\rho_{\text{вс.}i}}} \left(\frac{w D_{\text{экв}} \rho}{\mu} \right)^{0,6} \right]. \quad (4)$$

Согласно формуле Вошни, коэффициент теплоотдачи рассчитывался различными способами:

1. По формуле, указанной в статье [13]:

$$\alpha_t = 130 \frac{(p \cdot 10^{-5})^{0,8} \omega^{0,8}}{T^{0,53} D^{0,2}}, \quad (5)$$

где p — давление в цилиндре; T — температура в цилиндре; D — диаметр цилиндра; ω — скорость движения рабочего вещества в цилиндре, которая определяется (см. рис. 2):

$$\omega = 2,28 C_m, \quad (6)$$

где C_m — средняя скорость поршня:

$$C_m = \frac{S \cdot n}{30}, \quad (7)$$

где S — ход поршня; n — частота вращения коленчатого вала;

2. По формуле, представленной в статье [19]:

$$\alpha = 2817 \frac{(C_m p_i)^{0,786}}{D^{0,214} T_i^{0,525}}. \quad (8)$$

Также значение коэффициента теплоотдачи было рассчитано по формуле Г. Эйхельберга:

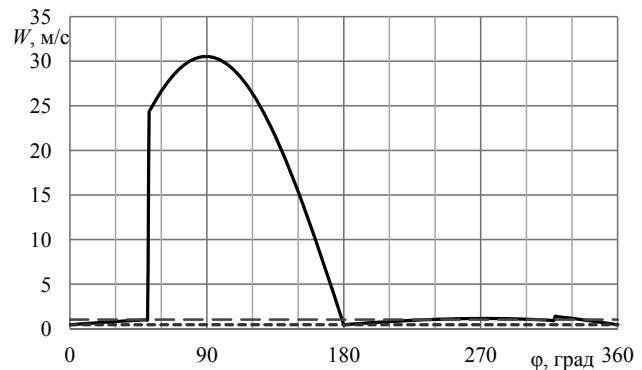


Рис. 2. Характерная скорость газа: — КОМДЕТ-ВКА; — формула (6); - - - формула (7)

Fig. 2. Characteristic velocity of gas: — KOMDET-VKA; — formula (6); - - - formula (7)

$$\alpha = 0,779 \cdot 10^{-2} C_m^{1/3} p_i^{0,5} T_i^{0,5}, \quad (9)$$

и по формуле Х. Цапфа:

$$\alpha = 3,227 \frac{C_m^{0,78} p_i^{0,78}}{D^{0,22} T_i^{0,52}}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлен результат сравнения коэффициента теплоотдачи, с учетом разных методик его определения. Видно, что существенное влияние на характер кривых коэффициента теплоотдачи оказывает значение характеристической скорости газа в полости цилиндра. Это подтверждается характеристиками, представленными на рис. 2, где показано, что в отличии от всех рассмотренных методик расчета только при расчете КОМДЕТ-ВКА учитывается изменение значения скорости рабочего вещества при всасывании в цилиндр. Интегральные характеристики компрессора, а именно p , $T=f(\phi)$ приведены на рис. 4. Они имеют аналогичный вид коэффициенту теплоотдачи. Характеристика, полученная по формуле Г. Эйхельберга, имеет наиболее близкие значения, полученные при сравнении с КОМДЕТ-ВКА, что говорит о необходимости более точного определения характеристической скорости на стадии всасывания рабочего вещества в полость цилиндра компрессора.

Расшифровка характерных точек цикла ступени компрессора:

3 — положение поршня в ВМТ ($\phi=0^\circ$), нагнетательный клапан открыт;

3' — момент закрытие нагнетательного клапана;

3'-4 — процесс расширения;

4 — момент начала открытия всасывающих клапанов;

4' — полное открытие всасывающего клапана;

1 — $\phi=180^\circ$ (положение поршня в НМТ), окончание процесса всасывания;

1' — закрытие всасывающего клапана, начало процесса сжатия;

2 — окончание процесса сжатия, начало открытия нагнетательного клапана;

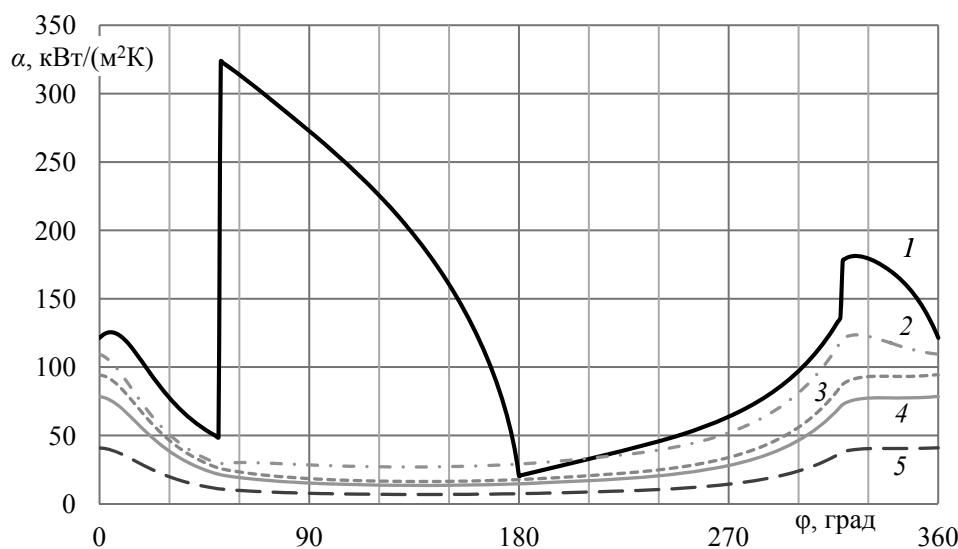


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи: 1 — КОМДЕТ-ВКА (формула (4)); 2 — Эйхельберг (формула (9));
3 — Цапфа (формула (10)); 4 — Воини (формула (8)), 5 — Воини (формула (5))

Fig. 3. Heat-transfer coefficient: 1 — KOMDET-VKA (formula (4)); 2 — Eichelberg (formula (9));
3 — Zapf (formula (10)); 4 — Woschni (formula (8)), 5 — Woschni (formula (5))

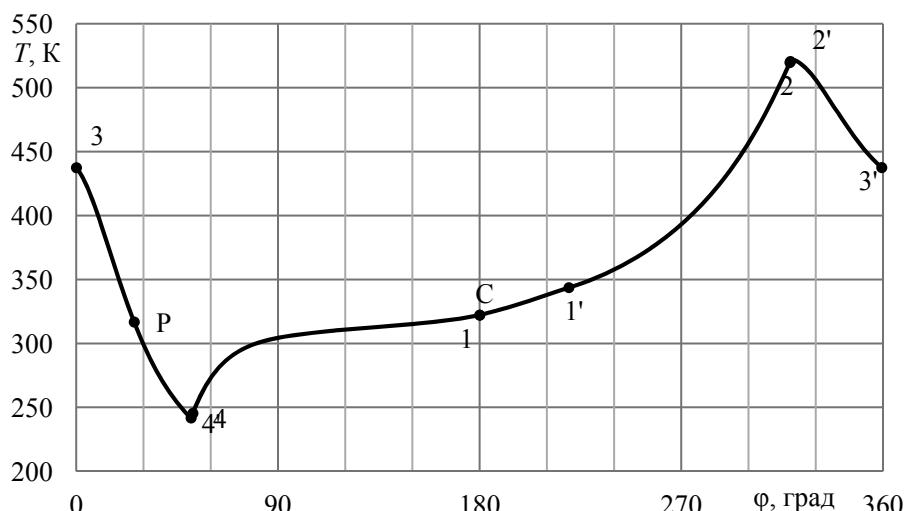
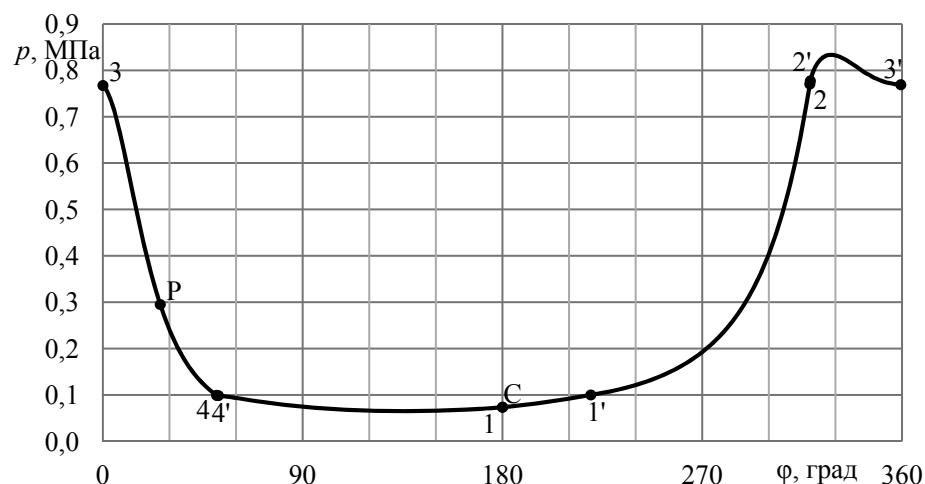


Рис. 4. Интегральные характеристики поршневого компрессора с линейным приводом
Fig. 4. Integral characteristics for a piston compressor with liner drive

- 2' — полное открытие нагнетательного клапана;
 2-2'-3 — процесс нагнетания;
 3 — положение поршня в ВМТ ($\phi=360^\circ$);
 р — момент равенства температур газа и стенок цилиндра на участке расширения;
 с — момент равенства температур газа и стенок цилиндра на участке сжатия ($T_{ct.\ u}=T_p=T_c$).

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Литература

1. Nusselt W. Der Waermeuebergang in der Verbrennungskraftsmaschine // Z. Ver. Dtsch. Ing. 1923. Vol. 67. P. 692.
 2. Eichelberg G. Some New Investigations on Old Combustion-Engine Problems // Engineering. 1939. Vol 148. P. 547.
 3. Annand W. D. Heat Transfer in the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines // Proc. Instn. of Mech. Engrs. 1963. Vol. 177. No. 36. P. 973.
 4. Woschni G. A universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine // SAE Transactions. 1967. Vol. 76. P. 3065.
 5. Adair R. P., Qvale E. B., Pearson J. T. Instantaneous heat transfer to the cylinder in reciprocating compressors // Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue University. 1972. P. 521–526.
 6. Chong M. S., Watson H. C. Prediction of heat and mass transfer during compression in reciprocating compressors // Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue University. 1976. Paper 230. P. 466–472.
 7. Keribar R., Morel T. Heat transfer and component temperature prediction in reciprocating compressors // Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue University. 1988. P. 454–463.
 8. Liu R. H., Zhou Z. C. Heat transfer between gas and cylinder wall of refrigerating reciprocating compressor // Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue University. 1984. P. 110–115.
 9. Pereira E. L. L., Deschamps C. J., Ribas Jr. F. A. Numerical analysis of heat transfer inside the cylinder of reciprocating compressors in the presence of suction and discharge processes // Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue University. 2010. no. 1310.
 10. Tan K. M., Ooi K. T. Heat transfer in compression chamber of a revolving vane (RV) compressor // Appl. Therm. Eng. 2011. vol 31 no 8–9. P. 1519–1526.
 11. Yuhong S., Bo Z., Dianbo X., Donghui Y., Xueyuan P. 3-D finite element simulation of the cylinder temperature distribution in boil-off gas (BOG) compressors // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 7278–7286.
 12. Žak Z., Emrich M., Takats M., Macek J. In-cylinder heat transfer modelling // MECCA. 2016. vol 03. P. 2–10.
 13. Кабанов А. Н. Выбор методики расчета процесса теплоотдачи в газовом двигателе с искровым зажиганием // Автомобильный транспорт, вып. 30. 2012. С. 96–102.
 14. Пеньков М. М., Казимиров А. В., Молостов А. В., Прилуцкий И. К., Веденников М. В., Молодова Ю. И., Горбушин А. Л. Ступень
1. Проведен анализ расчета коэффициента теплоотдачи на примере формул Г. Вошни, Х. Цапфа, Г. Эйфельберга и И. К. Прилуцкого.
 2. Полученные характеристики показывают, что существенное влияние на коэффициент теплоотдачи оказывает определение характерной скорости в цилиндре, особенно в процессе всасывания газа в цилиндр поршневого компрессора.
 3. Рекомендовано производить расчет коэффициента теплоотдачи в цилиндре поршневого компрессора с учетом определения характерной скорости по методике, предложенной авторами.

References

- поршневого компрессора с жидкостным охлаждением. Патент RU 2734088 от 09.12.2019, опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.
15. Программа «КОМДЕТ» (Инструкция пользователю): методические указания к практическим занятиям по дисциплинам «Машины низкотемпературной техники», «Компрессорные машины», «Расширительные машины» / А. И. Прилуцкий, И. К. Прилуцкий, Д. Н. Иванов и др. СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. 16 с.
16. Прилуцкий И. К., Прилуцкий А. И., Маковеева А. С., Молодов М. А. Алгоритм создания в программе КОМДЕТ-М рабочих веществ произвольного состава. СПб: Университет ИТМО, 2018. 79 с.
17. Прилуцкий И. К. Метод определения локальных текущих коэффициентов теплоотдачи в элементах ступеней машин объемного действия // Технические газы. 2013. № 4. с. 19–26.
18. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 472 с.
19. Zhao B., Du B., Peng X., Feng J. Effects of Low Suction Temperature on the Boil-off Gas compressor // International Compressor Engineering Conference. 2014. P. 2352.
- cooled piston compressor stage. Patent RU 2734088 dated 09.12.2019, publ. 12.10.2020, Bul. No. 29. (in Russian)
15. KOMDET program (User Manual): methodical instructions for practical classes in the disciplines «Machines of low-temperature equipment», «Compressor machines», «Expansion machines» / A. I. Prilutsky, I. K. Prilutsky, D. N. Ivanov, etc. St. Petersburg: SPbGUNiPT, 2009. 16 p. (in Russian)
16. Prilutsky I. K., Prilutsky A. I., Makoveeva A. S., Molodov M. A. Algorithm for creating working substances of arbitrary composition in the COMET-M program. St. Petersburg: ITMO University, 2018. 79 p. (in Russian)
17. Prilutsky I. K. Method for determining local current heat transfer coefficients in the elements of stages of volumetric machines. *Technical gases*. 2013. No. 4. pp. 19–26. (in Russian)
18. Kavtaradze R. Z. Local heat transfer in piston engines. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2007. 472 p. (in Russian)
19. Zhao B., Du B., Peng X., Feng J. Effects of Low Suction Temperature on the Boil-off Gas compressor. International Compressor Engineering Conference. 2014. P. 2352.

Сведения об авторах

Прилуцкий Игорь Кирович

Д. т. н., ВКА им. А. Ф. Можайского, 197198,
Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, 5592085@mail.ru

Молодова Юлия Игоревна

К. т. н., ВКА им. А. Ф. Можайского, 197198,
Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, julia_molodova@mail.ru

Татаренко Юлия Валентиновна

К. т. н., ВКА им. А. Ф. Можайского, 197198,
Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, lavrtat@mail.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



28-я международная выставка «Оборудование, технологии, сырье и ингредиенты для пищевой и перерабатывающей промышленности» 9-13 октября 2023 г.

«Агропроммаш» – международная выставка оборудования, машин и ингредиентов для пищевой и перерабатывающей промышленности – на протяжении двух десятилетий демонстрирует лучшие мировые достижения, способствуя внедрению новых современных технологий российскими предприятиями пищевой и перерабатывающей промышленности.

Организатор выставки:

ЦВК «Экспоцентр», 123100, Россия, Москва, Краснопресненская набережная, 14

Телефон: +7 (499) 795-37-23

Факс: +7 (495) 609-41-68

E-mail: voronin@expocentr.ru

Web: <https://www.agroprommash-expo.ru/>

