

УДК 621.514

## Повышение эффективности работы паровой холодильной машины с винтовым компрессором при регулировании производительности

Д-р техн. наук А. Н. НОСКОВ<sup>1</sup>, Д. С. ТАРАСЕНКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>dn.noskoff@rambler.ru, <sup>2</sup>d.tarasenkov@mail.ru

Университет ИТМО

*При использовании воздушного конденсатора в холодильной машине температура конденсации значительно зависит от параметров наружного воздуха. Для обеспечения устойчивой работы дросселирующего устройства искусственно поддерживают температуру конденсации не ниже определенной величины. Это приводит к излишним затратам энергии на сжатие пара в компрессоре. Приведена схема холодильной машины с винтовым компрессором, позволяющая уменьшить затраты энергии на производство холода путем уменьшения давления конденсации при понижении температуры окружающего воздуха и установки насоса перед дроссельным устройством. Работа холодильной машины с винтовым маслозаполненным компрессором при полной и частичной производительности на различных режимах имеет особенности. Рассмотрен регулятор винтового компрессора, состоящий из золотника и двух поворотных заслонок. Такая конструкция позволяет регулировать геометрическую степень сжатия  $\varepsilon_2$  при полной производительности и получить произвольные законы изменения  $\varepsilon_2$  при уменьшении производительности. Приведены зависимости холодопроизводительности, эффективной мощности и холодильного коэффициента при полной и 50% производительности винтового компрессора при уменьшении температуры конденсации. Были использованы экспериментальные и расчетные характеристики холодильного маслозаполненного винтового компрессора, работающего на фреоне R22. Применение схемы паровой холодильной машины с винтовым компрессором и насосом перед дроссельным вентилем позволяет существенно повысить энергетическую эффективность ее работы.*

**Ключевые слова:** холодильный винтовой компрессор, холодопроизводительность, температура конденсации, дроссельное устройство, насос.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.01.2017, принята к печати 15.05.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-38-42

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Носков А. Н., Тарасенков Д. С. Повышение эффективности работы паровой холодильной машины с винтовым компрессором при регулировании производительности // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 38–42.

## Improving the efficiency of vapor refrigerating machine with screw compressors at capacity control

D. Sc. A. N. NOSKOV<sup>1</sup>, D. S. TARASENKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>dn.noskoff@rambler.ru, <sup>2</sup>d.tarasenkov@mail.ru

ITMO University

*When using an air chiller condenser in refrigerating machine condensing temperature depends on the outside air parameters significantly. To ensure stable operation of the throttling device a condensation temperature not below a certain value is maintained artificially. This results in unnecessary energy costs for steam compression in the compressor. The article shows a diagram of the chiller with screw compressors that enables reducing energy costs for cold production by decreasing condensing pressure when the ambient temperature is lowered and the installing the pump in front of the throttling device. The operation of chiller with screw oil-flooded compressors at full and partial capacity in different modes has its specific features. The article describes the control of screw compressor consisting of a valve and two butterfly valves. This design allows adjusting geometric compression ratio at full capacity and obtaining arbitrary laws of variation when the capacity is decreased. The article shows the dependences of cooling, effective capacity, and coefficient of performance at full and 50% capacity of the screw compressor when condensing temperature is decreased. Experimental and computational characteristics of oil-filled refrigeration screw compressor operating on R22 Freon were used. The use of vapor refrigerating system with screw compressors and a pump in front of the throttle valve allows significant improving the energy-efficiency of the system.*

**Keywords:** refrigeration screw compressor, cooling capacity, condensation temperature, throttling device, pump.

**Article info:**

Received 10/01/2017, accepted 15/05/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-38-42

Article in Russian

**For citation:**Noskov A. N., Tarasenkov D. S. Improving the efficiency of vapor refrigerating machine with screw compressors at capacity control. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 2. p. 38–42.

В паровых холодильных машинах в настоящее время широко применяются маслозаполненные винтовые компрессоры (ВКМ) [1].

При работе холодильной машины с воздушным конденсатором, температура и давление конденсации определяются температурой наружного воздуха и, при ее понижении, эффективность работы холодильной машины повышается. При пониженном давлении конденсации происходит неустойчивая работа терморегулирующих вентилей (ТРВ), что приводит к неравномерной подаче жидкого хладагента в испаритель [1–3]. Для обеспечения устойчивой работы ТРВ температуру и давление конденсации поддерживают не ниже некоторой величины. Фирма *Danfoss* рекомендует температуру конденсации в среднетемпературной холодильной машине поддерживать не ниже 30 °С, а в низкотемпературной не ниже 20 °С [2]. Таким образом, затрачивается лишняя работа при сжатии пара в компрессоре.

В работе [3] рассмотрена работа холодильной машины, схема которой показана на рис. 1. Между конденсатором и регулирующим вентилем установлен насос, повышающий давление жидкого хладагента до величины, соответствующей давлению насыщения хладагента при температуре 30 °С, что обеспечивает устойчивую работу регулирующего вентиля. При понижении температуры конденсации давление в конденсаторе понижается, что приводит к повышению эффективности работы холодильной машины. Работа, затраченная насосом на повышение давления жидкого хладагента значительно меньше дополнительной работы на сжатие пара в ком-

прессоре. Работа по такой схеме позволяет поддерживать давление необходимое для нормальной работы ТРВ при понижении температуры наружного воздуха. В статье приведена оценка эффективности работы холодильной машины по такой схеме со спиральным и поршневым компрессором.

Работа холодильной машины с винтовым маслозаполненным компрессором при полной и частичной производительности имеет свои особенности. Существенным достоинством ВКМ является возможность регулирования производительности с помощью внутренних устройств. При регулировании производительности одним золотником вместе с уменьшением производительности уменьшается и геометрическая степень сжатия  $\epsilon_r$ , что приводит к увеличению потерь работы связанных с недосжатием пара хладагента [4, 5].

В работе [6] предложен регулятор, состоящий из золотника и двух поворотных заслонок. Такая конструкция регулятора позволяет изменять геометрическую степень сжатия  $\epsilon_r$  при полной производительности и получить произвольные законы изменения  $\epsilon_r$  при уменьшении производительности.

Для оценки эффективности работы паровой холодильной машины с насосом перед регулирующим вентилем необходимо рассчитать характеристики ВКМ при полной и 50% производительности.

Для этого были определены экспериментальные и расчетные зависимости холодопроизводительности, эффективной мощности и холодильного коэффициента компрессоров, работающих на фреоне R22. Эксперимен-

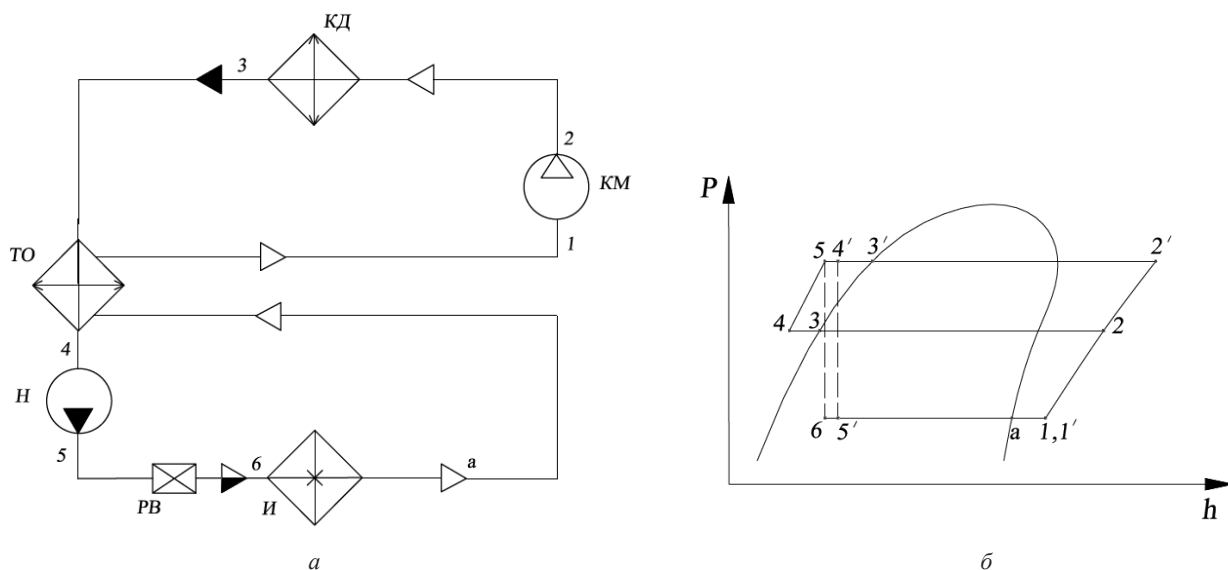


Рис. 1. Схема (а) и цикл работы (б) паровой холодильной машины:

КД — конденсатор; ТО — теплообменник; Н — насос; РВ — регулирующий вентиль; И — испаритель; КМ — компрессор; 1'-2'-3'-4'-5'-6' — цикл работы холодильной машины без насоса; 1-2-3-4-5-6 — цикл работы холодильной машины с насосом

тальные характеристики получены на кафедре низкотемпературной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО [4, 6].

Экспериментальный компрессор имеет следующие геометрические характеристики. Числа заходов ведущего (ВЦ) и ведомого (ВМ) винтов 4/6; наружные диаметры ВЦ и ВМ винтов 160 мм; длина винтов 144 мм; ход ВЦ винта 144 мм; частота вращения ВЦ винта 2940 об/мин; теоретическая объемная производительность 5,1 м<sup>3</sup>/мин; профили зубьев винтов — типоразмерного ряда СКБК [7]. Регулирование производительности осуществлялось золотником и поворотными заслонками [6].

Расчеты были произведены для винтового компрессора имеющего следующие геометрические характеристики. Числа заходов ВЦ и ВМ винтов 5/6; наружный диаметр ВЦ винта 137,5 мм; наружный диаметр ВМ винта 107,6 мм; ход ВЦ винта 215 мм; длина винтов 200 мм; частота вращения ВЦ винта 2940 об/мин; теоретическая объемная производительность 4,8 м<sup>3</sup>/мин;

профили зубьев винтов выполнены по [8]. При расчете эффективного КПД использовались зависимости, приведенные в [9–14].

На рис. 2 приведены зависимости эффективных КПД  $\eta_e$  компрессоров от наружной степени повышения давления  $\pi_n$  при работе с полной производительностью  $V_{т1}/V_{т2} = 1,0$  и относительной производительностью  $V_{т1}/V_{т2} = 0,5$  при температуре кипения хладагента  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ .

Для определения закона изменения текущего значения геометрической степени сжатия  $\epsilon_{г1}$  от относительной объемной производительности компрессора  $V_{т1}/V_{т2}$ , при котором величины эффективного КПД  $\eta_e$  имеют наибольшие значения, проведено экспериментальное исследование ВКМ с различными торцевыми окнами нагнетания которые изменялись с помощью сменных вставок.

На рис. 3 приведены зависимости  $\eta_e$  от  $\epsilon_{г1}$  при относительной производительности  $V_{т1}/V_{т2} = 0,5$  при различных внешних степенях сжатия и температуре кипения  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ . Из рассмотрения рисунков видно, что приведен-

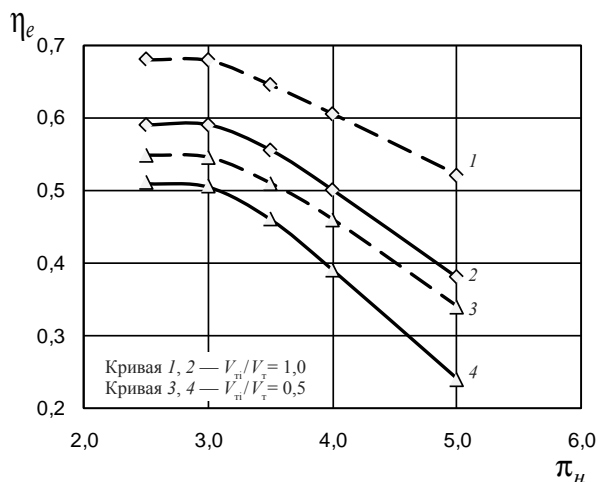


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД  $\eta_e$  винтового компрессора от наружной степени сжатия  $\pi_n$ :  
1, 3 — ВКМ с соотношением числа зубьев 5/6 (расчет);  
2, 4 — ВКМ по типоразмерному ряду (эксперимент)

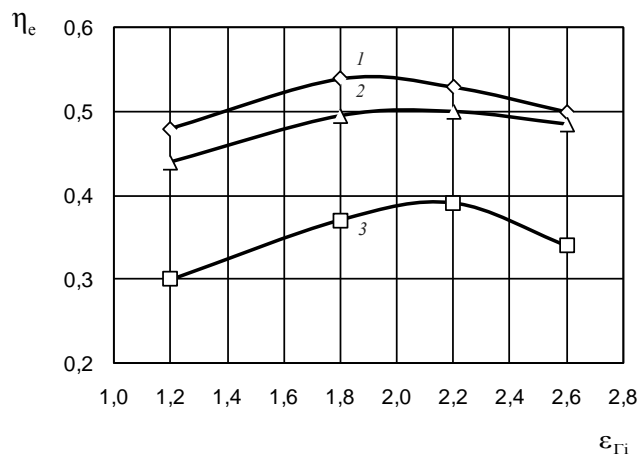


Рис. 3. Зависимость эффективного КПД  $\eta_e$  экспериментального винтового компрессора от геометрической степени сжатия  $\epsilon_{г1}$ : 1 —  $\pi_n = 2,5$ ; 2 —  $\pi_n = 3,0$ ; 3 —  $\pi_n = 4,0$

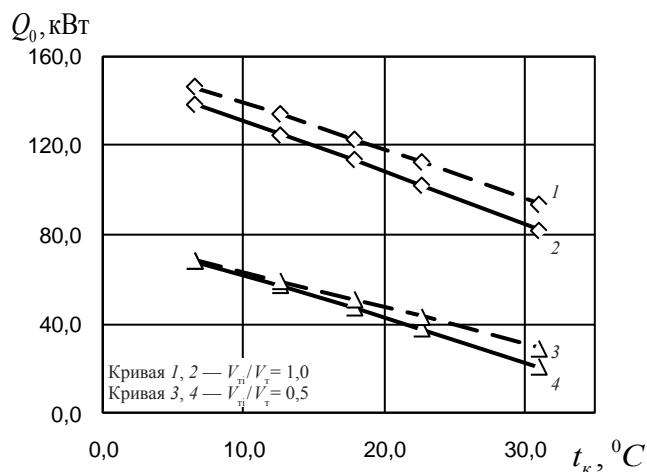


Рис. 4. Зависимость холодопроизводительности компрессора  $Q_0$  от температуры конденсации  $t_k$ :  
1, 3 — ВКМ с соотношением числа зубьев 5/6 (расчет);  
2, 4 — ВКМ по типоразмерному ряду (эксперимент)

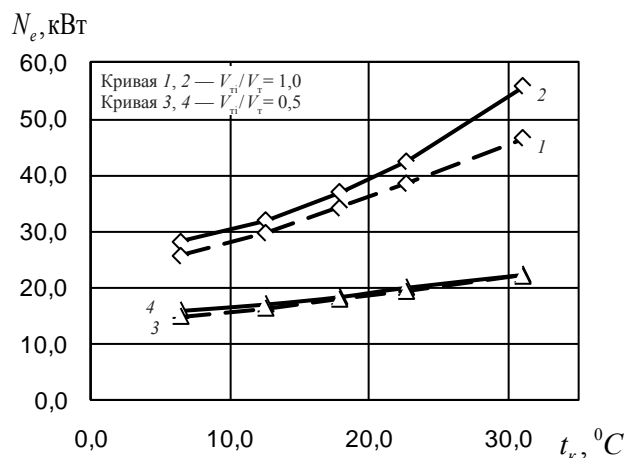


Рис. 5. Зависимость эффективной мощности компрессора  $N_e$  от температуры конденсации  $t_k$ :  
1, 3 — ВКМ с соотношением числа зубьев 5/6 (расчет);  
2, 4 — ВКМ по типоразмерному ряду (эксперимент)

ные кривые имеют максимумы, положение и абсолютная величина которых зависит от наружной степени сжатия  $\pi_n$ . При  $\pi_n = 2,5 \dots 4$  наибольшие величины  $\eta_{se}$  имеют место при  $\varepsilon_{ri} = 2,0 \dots 2,2$ . Зависимость  $\eta_e = f(\varepsilon_{ri})$  приведена в работе [15] и определяется линией  $f - q$ .

На рис. 4, 5, 6 показаны зависимости холодопроизводительности  $Q_0$ , эффективной мощности  $N_e$  и холодильного коэффициента холодильной машины с ВКМ от температуры конденсации  $t_k$  при полной и частичной производительности. Температура кипения  $t_0 = -20$  °С.

Из представленных зависимостей видно, что холодильный коэффициент паровой холодильной машины с винтовым компрессором при полной и частичной производительности при поддержании температуры конденсации в соответствии с температурой наружного воздуха увеличивается.

При уменьшении температуры конденсации с  $t_k = 31$  °С до  $t_k = 12,6$  °С холодильный коэффициент увеличивается при полной производительности с  $\varepsilon_e = 1,48$  до  $\varepsilon_e = 3,9$  у экспериментального компрессора и с  $\varepsilon_e = 2,02$  до  $\varepsilon_e = 4,5$  по результатам расчета, а при 50% производительности с  $\varepsilon_e = 0,93$  до  $\varepsilon_e = 3,34$  у экспериментального компрессора и с  $\varepsilon_e = 1,32$  до  $\varepsilon_e = 3,62$  по результатам расчета.

Повышение холодильного коэффициента холодильной машины происходит за счет уменьшения работы компрессора, так как затраты работы на повышение давления жидкости насосом значительно меньше затрат на сжатие пара. Величина работы насоса не превышает 2,5% от величины работы компрессора.

## Литература

1. Холодильные машины: Учеб. для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 2006. 944 с.
2. Холодильное оборудование. «Danfoss» (Дания). [Электронный ресурс]: <http://products.danfoss.ru/refrigeration-and-air-conditioning/#/>
3. Жердев А. А., Колесников А. С., Фролов Ю. Д. Цикл парокомпрессионной холодильной машины с плавающим давлением конденсации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2010. № 1–2. с. 137–146.
4. Пекарев В. И., Ведайко В. И., Алексеев А. П., Носков А. Н. Повышение эффективности работы винтового компрессора при уменьшении производительности с помощью подвижного золотника // Процессы холодильных машин и установок низкопотенциальной энергетики: Сб. научн. трудов. — СПб.: СПбГАХПТ, 1992. с. 24–27.
5. Носков А. Н. Регулирование геометрической степени сжатия винтового компрессора при изменении производительности // Компрессорная техника и пневматика. 1997. № 1–2. с. 63–66.
6. Носков А. Н., Зимков А. А. Регулирование производительности холодильного винтового компрессора золотником и поворотными заслонками // Вестник Международной академии холода. 2008. № 3. С. 10–13.
7. Амосов П. Е., Бобриков Н. И., Шварц А. И., Верный А. Л. Винтовые компрессорные машины: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1977. 256 с.

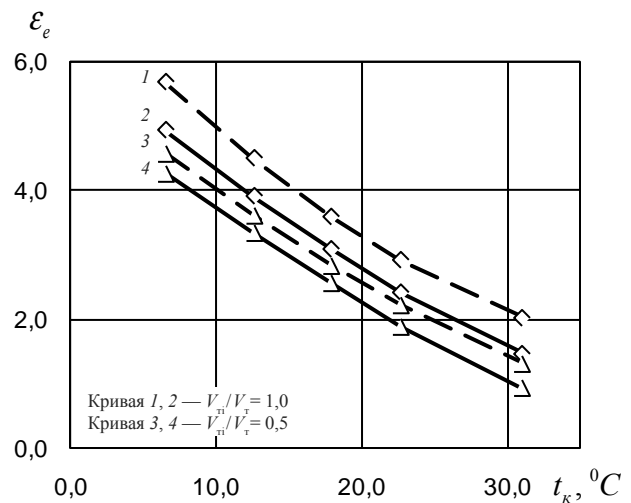


Рис. 6. Зависимость холодильного коэффициента компрессора  $\varepsilon_e$  от температуры конденсации  $t_k$ :  
1, 3 — ВКМ с соотношением числа зубьев 5/6 (расчет);  
2, 4 — ВКМ по типоразмерному ряду (эксперимент)

Таким образом, использование схемы с маслозаполненным винтовым компрессором и насосом приводит к повышению эффективности работы паровой холодильной машины при полной и частичной производительности при снижении температуры наружного воздуха.

## References

1. Refrigerators: The textbook for students of higher education institutions of specialty «Technique and Physics of Low Temperatures» / A. V. Baranenko, N. N. Bukharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevsky. SPb: Politekhnik, 2006. 944 p. (in Russian)
2. Refrigerating appliances. «Danfoss» (Denmark). [Electronic resource]: <http://products.danfoss.ru/refrigeration-and-air-conditioning/#/>
3. Zherdev A. A., Kolesnikov A. S., Frolov Yu. D. Tsikl of the vapor-compression refrigerator with the floating pressure of condensation. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie»*. 2010. Vol. 1–2. p. 137–146. (in Russian)
4. Pekarev V. I., Vedayko V. I., Alekseev A. P., Noskov A. N. Increase in overall performance of the screw compressor at decrease of efficiency by means of the relative frame золотник. *Processes of refrigerators and installations of a low-potential power engineering: Collection of scientific works*. St.Pb.: SPbGAHPT, 1992. p. 24–27. (in Russian)
5. Noskov A. N. Regulation of geometrical intensity of compression of the screw compressor at efficiency change. *Kompressoranaya tekhnika i pnevmatika*. 1997. Vol. 1–2. p. 63–66. (in Russian)
6. Noskov A. N., Zimkov A. A. Regulation of efficiency of the refrigerating screw compressor золотник and rotary valves. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda*: 2008. No 3. p. 10–13. (in Russian)
7. Amosov P. E., Bobrikov N. I., SHvarc A. I., Vernyj A. L. Screw compressor cars: Reference book. L.: Mashinostroenie, 1977. 256 p. (in Russian)

8. Патент РФ 2109170, МКИ F 04 C 18/16. Зубчатое зацепление винтового компрессора / Носков А. Н. 1998.
9. Носков А. Н., Зимков А. А. Расчет процесса всасывания маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Холодильная техника и кондиционирование. 2012, № 1.
10. Носков А. Н., Зимков А. А. Расчет процесса сжатия маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Холодильная техника и кондиционирование. 2013, № 1.
11. Носков А. Н. Расчет изменения зазоров между профильными поверхностями винтового компрессора // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 27–30.
12. Носков А. Н., Зверев Д. И., Тарасенков Д. С. Расчет процесса нагнетания маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014, № 1.
13. Потапова Д. В., Носков А. Н. Анализ процесса нагнетания холодильного винтового компрессора на различных хладагентах // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015, № 1.
14. Бухарин Н. Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров. — Л.: Машиностроение, 1983. 214 С.
15. Носков А. Н., Зимков А. А., Тарасенков Д. С. Регулирование производительности холодильного винтового компрессора // Вестник Международной академии холода. 2015. № 4. С. 66–70.
8. Russian Federation patent 2109170, MCI F 04 C 18/16. Gear gearing of the screw compressor. Noskov A. N. 1998. (in Russian)
9. Noskov A. N., Zimkov A. A. Calculation of process of an absorption of the maslozapolnenny refrigerating screw compressor. *Kholodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2012, No 1. (in Russian)
10. Noskov A. N., Zimkov A. A. Calculation of process of compression of the maslozapolnenny refrigerating screw compressor. *Kholodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2013, No 1. (in Russian)
11. Noskov A. N. Calculation of change of gaps between the profile surfaces of the screw compressor. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda*. 2013. No 3. p. 27–30. (in Russian)
12. Noskov A. N., Zverev D. I., Tarasenkov D. S. Calculation of process of forcing of the maslozapolnenny refrigerating screw compressor. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i kondicionirovanie»*. 2014, No 1. (in Russian)
13. Potapova D. V., Noskov A. N. The analysis of process of forcing of the refrigerating screw compressor on various coolants. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i kondicionirovanie»*. 2015, No 1. (in Russian)
14. Buharin N. N. Model operation of characteristics of centrifugal compressors. L.: Mashinostroenie, 1983. 214 p. (in Russian)
15. Noskov A. N., Zimkov A. A., Tarasenkov D. S. Regulation of efficiency of the refrigerating screw compressor. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda*. 2015, No. 4. p. 66–70. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Носков Анатолий Николаевич

д.т.н., профессор кафедры холодильной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, dn.noskoff@rambler.ru

#### Тарасенков Даниил Сергеевич

аспирант кафедры холодильной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, d.tarasenkov@mail.ru

### Information about authors

#### Noskov Anatolii Nikolaevich

D. Sc., professor of department of refrigerating technique and renewable power engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, dn.noskoff@rambler.ru

#### Tarasenkov Daniil Sergeevich

graduate student of department of refrigerating technique and renewable power engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, d.tarasenkov@mail.ru

## О Перечне рецензируемых научных изданий\*

В соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г., **1 декабря 2015 г.** сформирован Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издания, текущие номера которых или их переводные версии входят хотя бы в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования Web of Science, Scopus, Astrophysics Data System, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, Agris или GeoRef считаются входящими в Перечень по отраслям науки, соответствующим их профилю.

**Вестник Международной академии холода включен в Перечень по двум международным базам: Agris (Agricultural Research Information System) и Chemical Abstracts.**

\*На сайте ВАК, в справочной информации об изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (по состоянию на 16.01.2017) Вестник МАХ опубликован под № 355.