

УДК 621.515.4

Методы численного моделирования тепловых деформаций рабочих органов винтового однороторного компрессора

Д-р техн. наук В. А. ПРОНИН¹, Д. В. ЖИГНОВСКАЯ², В. А. ЦВЕТКОВ³, А. В. КОВАНОВ⁴

¹maior.pronin@mail.ru, ²diana.zhignovskaya@gmail.com, ³wadimtsvetkov@mail.ru, ⁴Kovanov76@yandex.ru

Университет ИТМО

Тепловые деформации могут оказывать существенное влияние на взаимное расположение деталей, ввиду различной рабочей температуры, а также их изготовления из различных материалов. Данные обстоятельства зачастую приводят к возникновению термических зазоров или натягов в сочленениях, что необходимо учесть при холодной сборке узлов. Винтовой однороторный компрессор (ВКО) имеет в своей конструкции зазоры, а поверхности деталей их образующие подвергнуты тепловой деформации, поэтому разработка методики расчета геометрических параметров деталей ВКО с учетом их тепловых деформаций необходима для корректной работы ВКО в процессе его эксплуатации. Данная методика позволит назначить минимально безопасные зазоры и допуски на рабочие органы ВКО на стадии их изготовления. В статье рассматривается зазор между торцевой поверхностью зуба отсекаателя и поверхностью винтовой канавки центрального винта-ротора. С одной стороны, величина рассматриваемого зазора должна компенсировать тепловую деформацию деталей для предотвращения заклинивания. С другой стороны, минимизация данного зазора должна обеспечивать достижение эффективных показателей работы ВКО, что оказывает наибольшее влияние на его рабочие характеристики. Предлагаемый в работе метод численного моделирования рабочего процесса в компрессоре позволит наиболее дифференцированно подойти к учету тепловых факторов, влияющих на энергетические показатели машины.

Ключевые слова: холодильная техника, газодинамика, винтовой однороторный компрессор, зуб отсекаателя окружно-го профиля, 3D-моделирование, зазор, тепловое поле, деформация, ANSYS.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 04.06.2021, принята к печати 14.10.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-12-17

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Пронин В. А., Жигновская Д. В., Цветков В. А., Кованов А. В. Методы численного моделирования тепловых деформаций рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2021. № 4. С. 12–17. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-12-17

Methods of numerical simulating thermal deformations of working bodies for a screw single-rotor compressor

D. Sc. V. A. PRONIN¹, D. V. ZHIGNOVSKAIA², V. A. TSVETKOV³, A. V. KOVANOV⁴

¹maior.pronin@mail.ru, ²diana.zhignovskaya@gmail.com, ³wadimtsvetkov@mail.ru, ⁴Kovanov76@yandex.ru

ITMO University

Thermal deformations can have a significant impact on the mutual arrangement of parts due to different operating temperatures, as well as on their manufacturing from different materials. These circumstances often lead to the occurrence of thermal gaps or tightness in the joints, which must be taken into account at cold assembly of nodes. A screw single-rotor compressor has gaps in its design and the surfaces of the parts forming them are subjected to thermal deformation, therefore, the development of a methodology for calculating the geometric parameters of the screw single-rotor compressor parts, taking into account their thermal deformations, is necessary for the correct operation of the screw single-rotor compressor during its operation. This technique will allow you to assign minimum safe clearances and tolerances to the working bodies of the screw single-rotor compressor at the stage of their manufacture. The article considers the gap between the end surface of the cut-off tooth and the surface of the helical groove of the central rotor screw. On the one hand, the size of the gap under consideration should compensate for the thermal deformation of the parts to protect against jamming. On the other hand, minimizing the gap should ensure the achievement of effective performance indicators of the screw single-rotor compressor, which has the greatest impact on its performance characteristics. The proposed method of numerical simulating the working process in the compressor will allow the most differentiated approach to taking into account the thermal factors affecting the energy performance of the machine.

Keywords: refrigeration engineering, gas dynamics, single-rotor screw compressor, circular profile cutter tooth, 3D-modeling, clearance, thermal field, deformation, ANSYS.

Article info:

Received 04/06/2021, accepted 14/10/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-12-17

Article in Russian

For citation:Pronin V. A., Zhignovskaia D. V., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V. Methods of numerical simulating thermal deformations of working bodies for a screw single-rotor compressor. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 4. p.12–17.

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-12-17

Введение

Энергетические характеристики винтового однороторного компрессора зависят от величины минимально безопасных зазоров в рабочей части машины [1]. Для достижения эффективных показателей работы винтового однороторного компрессора при проектировании необходимо учитывать зазоры, которые оказывают наибольшее влияние. Поэтому минимизация зазоров — одно из актуальных направлений повышения эффективности винтовых однороторных компрессоров. Для винтовых компрессоров средней производительности радиальный зазор между торцевой поверхностью зуба отсекаателя и поверхностью винтовой канавки устанавливается в диапазоне 0,02–0,03 мм. Величина зазоров влияет на величину протечек компримируемой среды, а также на его безопасную эксплуатацию. При назначении минимально безопасных зазоров учитываются как силовые, так и тепловые деформации различных деталей и узлов компрессора [2]–[4]. В винтовом однороторном компрессоре (ВКО) тепловым деформациям подвержены корпус, центральный винт, отсекатели. При нагреве центрального винта изменяются геометрические параметры канавок и диаметр самого винта. Но в первую очередь на безопасно минимальные зазоры влияет тепловое расширение зубьев отсекаателей (Бронза). Соответственно, линейные размеры зуба подвержены большему влиянию тепловых деформаций, чем корпус (чугун, сталь) и центральный винт (сталь) [5]–[8].

Цели и задачи

На сегодняшний день актуальным вопросом является повышение эффективности и надежности работы винтовых однороторных компрессоров. Одной из существующих проблем считается проблема совершенствования рабочих органов винтового компрессора. Для достижения настоящей цели была поставлена и решена задача оптимизации параметров рабочих органов винтового однороторного компрессора путем назначения минимально безопасных зазоров в рабочей части с учетом тепловых деформаций. Также особое влияние будут ока-

зывать и силовые деформации на рабочие органы ВКО. Авторами была подробно изложена методика расчета сил и моментов, действующих на рабочие органы ВКО в статье [5]. Предложенные, в статье алгоритмы расчетов тепловых деформаций могут быть внедрены при проектировании винтового однороторного компрессора с окружным профилем зуба отсекаателя.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования рассмотрен опытный образец ВКО со следующими параметрами ротора и отсекаателя и условиями работы:

- число зубьев винта $z_1=4$ и число зубьев отсекаателя $z_2=5$;
- диаметр ротора $D_{e1}=160$ мм и диаметр отсекаателя $D_{e2}=100$ мм;
- начальный диаметр окружности зубьев отсекаателя $D_{H2}=100$ мм;
- межосевое расстояние $a_w=130$ мм;
- радиус зуба отсекаателя $r_0=30$ мм.
- $\Delta P=0,7$ МПа, $T_{\max}=120$ °С.

Материалы, из которых изготавливаются рабочие органы ВКО и их параметры представлены в табл. 1.

Твердотельные модели ротора и зуба отсекаателя, созданные в среде «КОМПАС-3D», были импортированы в систему ANSYS.

Для определения максимальных тепловых деформаций рассмотрим момент, когда зуб отсекаателя подходит к кромке окна нагнетания, где действует максимальная температура 120 °С, максимальный перепад давления 0,7 МПа. Математическое моделирование тепловых деформаций возможно представить, как и в декартовых, так и в полярных координатах [9, 10].

Также для расчета тепловых деформаций необходимо знать распределение тепловых полей. Данный метод базируется на решении уравнений Лапласа (двухмерного или трехмерного типа), описывающее стационарное распределение температурных полей между зубом отсекаателя и канавкой центрального винта.

Таблица 1

Характеристики материалов

Table 1

Characteristics of the materials

Деталь	Материал	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$ (МПа)	Плотность ρ , (кг/м ³)	Коэффициент температурного расширения $\alpha \cdot 10^6$ (1/К)
Винт-ротор, ролик отсекаателя	Сталь 45	0,3	2,01	7799	11,9
Зуб отсекаателя	Бронза БрО10Ф1	0,35	1,03	8760	17

$$\Delta T_i(x) = 0; \quad x \in \Omega_i; \quad i = 1, 2.$$

Двумерный оператор уравнения Лапласа

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x)}{\partial y^2}, \quad (1)$$

где $x=(x, y)$ — точки двумерного пространства (рис. 1); T_i — температура зуба отсекателя; Ω_i — двумерная область занимаемая зубом отсекателя и канавкой винта.

Значение $i=1$ соответствует области центрального винта, $i=2$ — области зуба отсекателя.

Далее преобразуем уравнение (1) к полярной системе координат:

$$x = r \cdot \cos\varphi; \quad y = r \cdot \sin\varphi.$$

Дифференцируя по правилу сложной функции, получим

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{y}{x}.$$

Применяя данное правило сложной функции к про-

изводным $\frac{\partial T}{\partial x}$ и $\frac{\partial T}{\partial y}$, найдем вторые частные производные

[12, 13]. Таким образом, уравнение Лапласа в полярных координатах имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (2)$$

В полярной система координат расчетная схема зуба отсекателя представлена в виде сетки с заданным шагом h (рис. 1, 2).

Рассмотрим задачу Дирихле для замены оператора Лапласа

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = f(x, y). \quad (3)$$

Используя формулу численного дифференцирования на середину для второй производной по каждой переменной (схема «крест»), получим сеточное уравнение

$$\frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{h^2} + \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{h^2} = f_{i,j}. \quad (4)$$

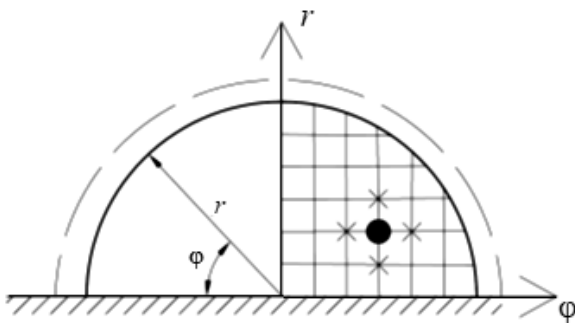


Рис. 1. Конечно-разностная сетка зуба отсекателя

Fig. 1. Finite-difference grid of the cutter tooth

Результаты и обсуждения

Разработка методики расчета геометрических параметров деталей с учетом тепловых деформаций состоит из методов математического моделирования и расчета деформаций деталей, с учетом тепловых воздействий. Данная методика в дальнейшем позволит назначить минимально безопасные зазоры и допуски на рабочие органы ВКО в процессе их изготовления. Вышеизложенные методы не обладают трехдиагональной структурой, что существенно усложняет процесс подсчета. Но в данном случае, схема «крест» может быть модифицирована для любой прямоугольной области. Интегрированные в рабочую среду 3D модели ВКО изображены на рис. 3, 4. Модели будут использоваться в качестве конечноэлементных для проведения дальнейшего анализа. Сам анализ будет производиться на базе программного комплекса ANSYS Mechanical, позволяющем производить расчеты в области механики сплошной среды [10]. Тепловые деформации рассчитываются путем решения связанной задачи в модулях Steady-State Thermal и Static Structural (рис. 5, 6).

На рис. 5 показана общая деформация отсекателя при заданных условиях. Деформация увеличивается от оси отсекателя до торцевой поверхности зуба отсекателя. Максимальное значение наблюдается в вершине зуба. Значения деформаций по контуру торцевой части зуба отсекателя отмечены маркерами.

Как показано на рис. 6, центральный винт-ротор расширяется и деформируется по поверхности впадины. Максимальное значение деформации наблюдается в области впадины, при таком положении, при котором полость подходит к окну нагнетания.

Выводы

Анализ результатов проведенного моделирования теплового воздействия на рабочие органы ВКО, согласно изложенной методике, делает возможным обозначить следующие выводы:

1. Максимальные значения тепловой деформации при перепаде давления в камере принятом 0,7 МПа и максимальной температуре 120 °С составляют: для зуба отсекателя (в его вершине) — 0,0715 мм; для винта-ротора (для впадины в области окна нагнетания) — 0,0640 мм.

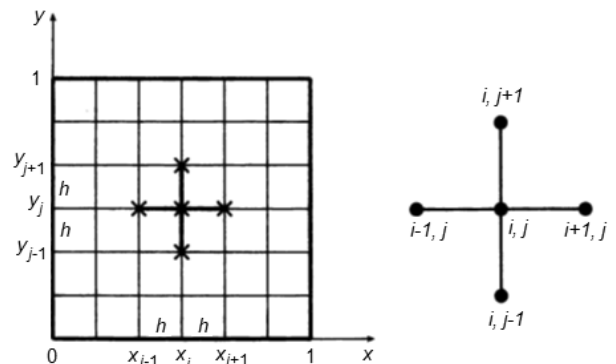


Рис. 2. Конечно-разностная сетка и шаблон схемы «крест» для эллиптической уравнений

Fig. 2. Finite-difference grid and «cross» template for elliptic equations

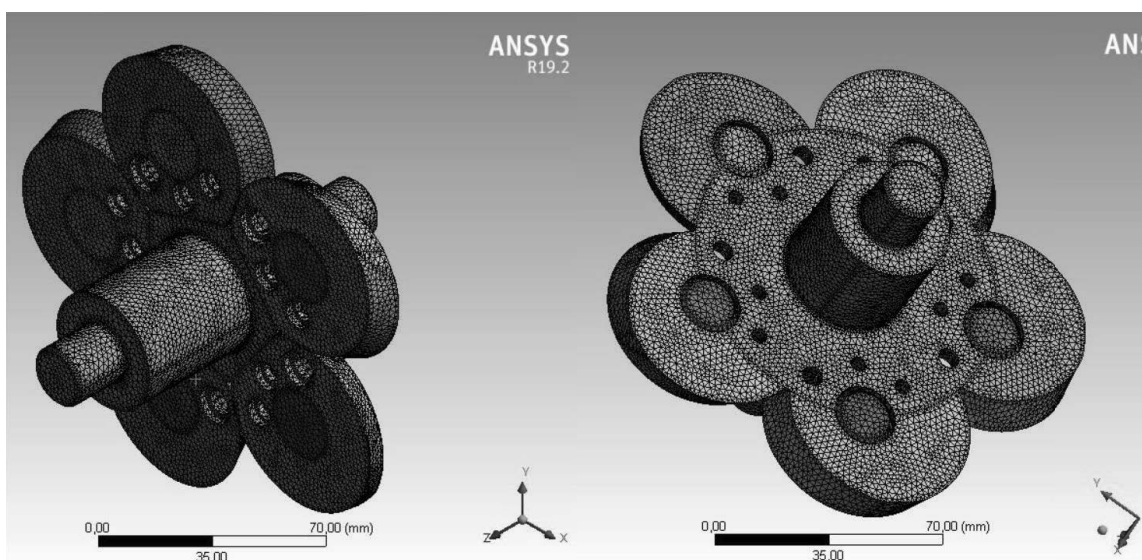


Рис. 3. Модель отсекателя в программном комплексе ANSYS
 Fig. 3. Cutter model made by ANSYS software

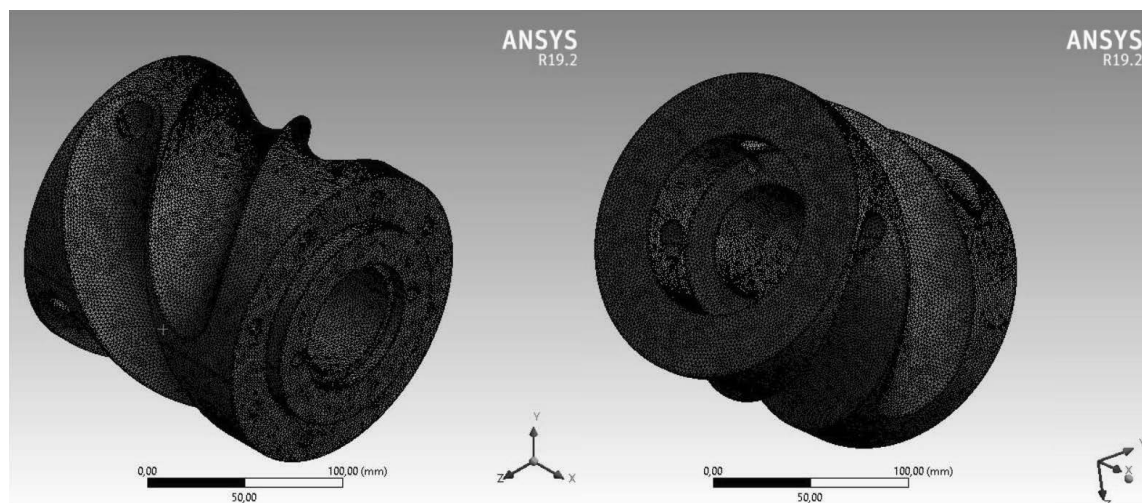


Рис. 4. Модель винта-ротора в программном комплексе ANSYS
 Fig. 4. Rotor screw model made by ANSYS software

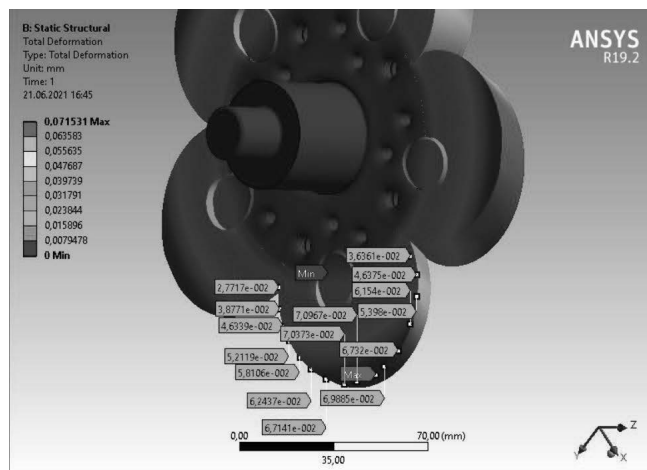


Рис. 5. Тепловая деформация отсекателя ВКО
 Fig. 5. Thermal deformation of the cutter in screw single-rotor compressor

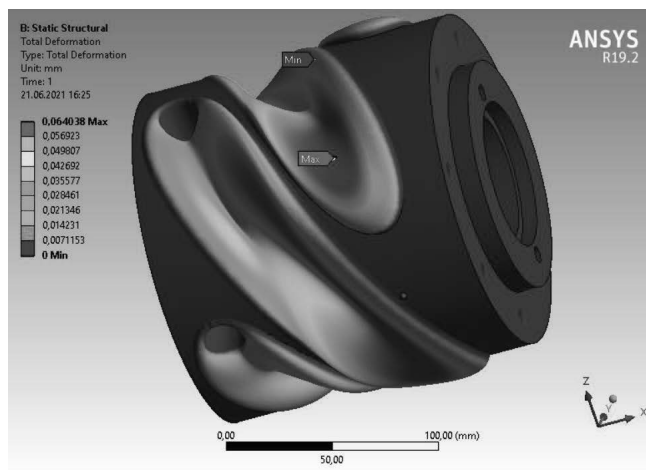


Рис. 6. Тепловая деформация винта-ротора ВКО
 Fig. 6. Thermal deformation of the rotor screw in screw single-rotor compressor

2. Для обеспечения корректной работы ВКО (предотвращения заклинивания рабочих органов из-за температурного расширения деталей и в то же время минимизации зазоров, ввиду уменьшения протечек компримируемой среды) рекомендуется задать радиальный зазор между торцевой поверхностью зуба отсекаателя и поверхностью винтовой канавки центрального винта-ротора равным 0,03–0,05 мм.

Для определения количественной картины был проинтегрирован тепловой расчет ВКО. Данный расчет показыва-

ет изменение геометрических размеров рабочих органов с учетом тепловых деформаций. Планируемый результат нашей работы состоит в повышении эффективности ВКО, так как зазоры вплотную влияют на все энергетические характеристики компрессора. Поэтому минимизация зазоров напрямую связана с ее энергоэффективностью. А метод математического моделирования рабочего процесса в компрессоре позволит наиболее дифференцированно подойти к учету силовых и тепловых факторов, влияющих на энергетические показатели машины [15]–[17].

Литература

References

1. Винтовой однороторный маслозаполненный компрессор: Патент РФ 199030: МПК7 F 04 C 18/16 / Кузнецов Л. Г. Кузнецов Ю. Л., Пронин В. А., Бураков А. В., Божедомов А. В., Котлов Н. А.; заявитель и патентообладатель АО «Компрессор», — заявл. 2020114579; опубл. 07.08.2020, Бюл. № 22.
2. Liu F. et al. Deformation analysis of the main components in a single screw compressor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2015. vol. 90. no. 1. p. 012011.
3. Aistov I. P., Vansovich K. A. Assessment of the loaded state of the piston unit cylinder stage taking into account of temperature exposure // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. vol. 1260. no. 11. p. 112002.
4. Zhang Z., Wu W. Numerical investigation of thermal deformation of meshing pairs in single screw compressor // Applied Thermal Engineering. 2021. vol. 188. p. 116614.
5. Pronin V. A., Kuznetsov Y. L., Zhignovskaia D. V. Features of designing screw compressors for the oil and gas industry // AIP Conference Proceedings, IET, 2018, Vol. 2007, pp. 030017.
6. Suman A., Ziviani D., Gabrielloni J., Pinelli M., ets. Different numerical approaches for the analysis of a single screw expander. // 71st conference of the italian thermal machines engineering association (ATI 2016). In Energy Procedia. 2016 (101). p. 750–757.
7. Chen N. Aerothermodynamics of Turbomachinery — Analysis and Design. Singapore, John Wiley & Sons, 2011. p. 448.
8. Сакун И. А. О повышении эффективности винтовых компрессоров холодильных машин // Холодильная техника. 1981. № 6. с. 18–21.
9. Пронин В. А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики [Текст]: дис. докт. техн. наук. / Пронин Владимир Александрович. СПб., 1998, 226 с.
10. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
11. Excell J. The rise of additive manufacturing. // The Engineer. Retrieved. 2013. p. 31–56.
12. Bloch H. P. and Hoefner J. J. Reciprocating Compressors: Operation & Maintenance, Gulf Professional Publishing, 1996.
13. Tian F., Tao K., and Shao J. The Research on Meshing Pair Profile of Single-Screw Compressor, IEEE Computer Society, Wuhan, China, 2010.
14. Большаков В. П. Твердотельное моделирование деталей в САД-системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. СПб.: Питер, 2015. 480 с.
15. Pronin V. A., Malyshev A. A., Dolgovskaia O. V. Calculation of Leakages of Compressed Media in Screw Compressors // Chemical and Petroleum Engineering, IET. 2018, Vol. 54, No. 3–4, pp. 183–187.
1. Screw single-rotor oil-filled compressor: Patent of the Russian Federation 199030: МПК7 F 04 C 18/16 / Kuznetsov L. G. Kuznetsov Yu. L., Pronin V. A., Burakov A. V., Bozhedomov A. V., Kotlov N. A.; applicant and patent holder of JSC «Compressor», — application 2020114579; publ. 07.08.2020, Bul. No. 22. (in Russian)
2. Liu F. et al. Deformation analysis of the main components in a single screw compressor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2015. vol. 90. no. 1. p. 012011.
3. Aistov I. P., Vansovich K. A. Assessment of the loaded state of the piston unit cylinder stage taking into account of temperature exposure. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. vol. 1260. no. 11. p. 112002.
4. Zhang Z., Wu W. Numerical investigation of thermal deformation of meshing pairs in single screw compressor. Applied Thermal Engineering. 2021. vol. 188. p. 116614.
5. Pronin V. A., Kuznetsov Y. L., Zhignovskaia D. V. Features of designing screw compressors for the oil and gas industry. AIP Conference Proceedings, IET, 2018, Vol. 2007, pp. 030017.
6. Suman A., Ziviani D., Gabrielloni J., Pinelli M., ets. Different numerical approaches for the analysis of a single screw expander. 71st conference of the italian thermal machines engineering association (ATI 2016). In Energy Procedia. 2016 (101). p. 750–757.
7. Chen N. Aerothermodynamics of Turbomachinery — Analysis and Design. Singapore, John Wiley & Sons, 2011. p. 448.
8. Sakun I. A. On improving the efficiency of screw compressors of refrigerating machines. Refrigerating equipment. 1981. No. 6. pp. 18–21. (in Russian)
9. Pronin V. A. Screw single-rotor compressors for refrigeration and pneumatics [Text]: diss.doct. technical sciences. / Pronin Vladimir Alexandrovich. St. Petersburg, 1998, 226 p. (in Russian)
10. Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. Fundamentals of work in ANSYS 17. Moscow: DMK Press, 2017. 210 pp. (in Russian)
11. Excell J. The rise of additive manufacturing. // The Engineer. Retrieved. 2013. p. 31–56.
12. Bloch H. P. and Hoefner J. J. Reciprocating Compressors: Operation & Maintenance, Gulf Professional Publishing, 1996.
13. Tian F., Tao K., and Shao J. The Research on Meshing Pair Profile of Single-Screw Compressor, IEEE Computer Society, Wuhan, China, 2010.
14. Bolshakov V. P. Solid-state modeling of parts in SAE systems: AutoCAD, COMPASS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. St. Petersburg: Peter, 2015. 480 p. (in Russian)
15. Pronin V. A., Malyshev A. A., Dolgovskaia O. V. Calculation of Leakages of Compressed Media in Screw Compressors. Chemical and Petroleum Engineering, IET. 2018, Vol. 54, No. 3–4, pp. 183–187.

16. Пронин В. А., Миникаев А. Ф., Жигновская Д. В., Кузнецов Ю. Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1 (66). С. 61–66.
17. Сакун И. А. Винтовые компрессоры: Основы теории, методы расчета, конструкции. Л.: Машиностроение, 1970. 400 с.
16. Minikayev A. F., Pronin V. A., Zhignovskaya D. V., Kuznetsov Yu. L. The use of computer modelling for the development of the working bodies' profiles for screw single-rotor compressor. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 1. p. 61–66. (in Russian)
17. Sakun I. A. Screw compressors: Fundamentals of theory, calculation methods, designs. L.: Mechanical Engineering, 1970. 400 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Пронин Владимир Александрович

Д. т. н., профессор, профессор факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, maior.pronin@mail.ru

Жигновская Диана Валерьевна

Аспирант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, diana.zhignovskaya@gmail.com

Цветков Вадим Александрович

Аспирант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, wadimsvetkov@mail.ru

Кованов Александр Викторович

Аспирант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Kovanov76@yandex.ru

Information about authors

Pronin Vladimir A.

D. Sc., Professor, Professor of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, maior.pronin@mail.ru

Zhignovskaia Diana V.

Graduate student of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, diana.zhignovskaya@gmail.com

Tsvetkov Vadim A.

Graduate student of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, wadimsvetkov@mail.ru

Kovanov Aleksandr V.

Graduate student of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, Kovanov76@yandex.ru



7th IIR Conference on Sustainability and the Cold Chain

The IIR conference series on Sustainability and the Cold Chain is recognised as a cutting-edge event on the cold chain which addresses the ever-increasing demand for knowledge-sharing in this essential sector.

This prestigious biennial conference attracts international audiences of researchers and industrialists, providing an opportunity to showcase the latest developments in sustainability, retail refrigeration and the cold chain.

Subjects

Main commissions: Refrigerating equipment; Cryobiology, cryomedicine; Food science & engineering

Themes: Cold chain, interfaces

Keywords: Cold chain; Sustainability

Information

Organisers:

IOR (Institute of Refrigeration, UK)

Contact:

iccc2022@ior.org.uk

Official websites:

<https://iifir.org/en/events/7th-iir-conference-on-sustainability-and-the-cold-chain>