

УДК 621.514.5

## Совершенствование конструкции внутреннего регулятора объемной производительности винтового однороторного компрессора

В. А. ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук В. А. ПРОНИН<sup>2</sup>, Л. В. ИВАНОВ<sup>3</sup>, П. А. БЕЛОВ<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>vatsvetkov@itmo.ru, <sup>2</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>3</sup>lvivanov@itmo.ru, <sup>4</sup>mr.beloff99@gmail.com  
Университет ИТМО

*Процесс регулирования производительности винтовых компрессоров требует применения эффективных и надежных систем регулирования. Практика показывает, что встроенные регуляторы производительности зарекомендовали себя как оптимальное техническое решение в данном направлении. Однако, в ряде случаев, устройство таких регуляторов требует внесения конструктивных изменений в компрессоре, с образованием дополнительных полостей в корпусе, наличия подвижных элементов, сложных систем привода и т. д. Данные обстоятельства отрицательно сказываются на простоте и надежности регулятора, а также становятся причиной увеличения протечек рабочего вещества. В данном ключе разработка простой и эффективной конструкции регулирования производительности встроенного типа является актуальной.*

**Ключевые слова:** винтовой компрессор, производительность компрессора, регулирование производительности, поворотное кольцо, однороторный винтовой компрессор, ANSYS.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.01.2024, одобрена после рецензирования 13.03.2024, принята к печати 15.03.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-3-12

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Цветков В. А., Пронин В. А., Иванов Л. В., Белов П. А. Совершенствование конструкции внутреннего регулятора объемной производительности винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2024. № 2. С. 3–12. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-3-12

## Improving design of internal regulator of volumetric capacity for a screw single-rotor compressor

V. A. TSVETKOV<sup>1</sup>, D. Sc. V. A. PRONIN<sup>2</sup>, L. V. IVANOV<sup>3</sup>, P. A. BELOV<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>vatsvetkov@itmo.ru, <sup>2</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>3</sup>lvivanov@itmo.ru, <sup>4</sup>mr.beloff99@gmail.com  
ITMO University

*The process of capacity control for screw compressors requires the use of efficient and reliable control systems. Experience has shown built-in capacity regulators to be the optimal technical solution in this direction. However, in a number of cases, the design of such regulators requires structural changes in the compressor with the formation of additional cavities in the casing, the presence of moving elements, complex drive systems, etc. This adversely affects the simplicity and reliability of the regulator, as well as may be the cause of increased leakage of the working substance. Thus, the development of a simple and effective design for a built-in capacity regulator is relevant.*

**Keywords:** screw compressor, compressor capacity, capacity regulation, rotary ring, single-rotor screw compressor, ANSYS.

### Article info:

Received 12/01/2024, approved after reviewing 13/03/2024, accepted 15/03/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-3-12

Article in Russian

### For citation:

Tsvetkov V. A., Pronin V. A., Ivanov L. V., Belov P. A. Improving design of internal regulator of volumetric capacity for a screw single-rotor compressor. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 2. p. 3-12. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-3-12

## Введение

Регулирование объемной производительности компрессоров обусловлено их работой в режимах частичной нагрузки [1]–[3]. Данный процесс обеспечивается за счет применения различных способов регулирования производительности: без регулирующих устройств, с использованием регулирующих устройств (внешних и внутренних), а также при помощи некоторых комбинированных устройств [4]. Зачастую, предпочтение отдается встроенным устройствам регулирования производительности ввиду их эффективности с точки зрения обеспечения приемлемых энергетических характеристик компрессора, компактности, простоты изготовления и эксплуатации. Для винтового однороторного компрессора (ВКО) авторами, на стадии концепции, была предложена конструкция встроенного регулятора [5], а также разработана математическая модель процесса регулирования производительности [6].

Целью данной работы является разработка и исследование конструкции встроенного регулятора производительности ВКО нового типа — поворотного регулировочного кольца. Для достижения поставленной цели, определены следующие задачи.

1. Обосновать выбор наиболее предпочтительного варианта конструкции регулировочного кольца, основываясь на особенностях работы ВКО, а также моделировании силовых и тепловых деформаций на базе ANSYS. Задать рабочие зазоры между рабочими элементами в зоне регулирования производительности.

2. Верифицировать математическую модель регулирования производительности ВКО при помощи регулировочного кольца на базе ANSYS.

## Обоснование предпочтительного варианта поворотного регулировочного кольца.

### Моделирование силовых и тепловых деформаций

На настоящем этапе разработки к рассмотрению предлагаются несколько вариантов конструкций регулировочного кольца, основанные на представленном ранее концепте данной конструкции [5, 6] (рис. 1). Проводится

моделирование силовых деформаций, напряжений и температурных деформаций. В результате определения предпочтительного варианта задаются рабочие зазоры между рабочими элементами.

Объектом исследования является экспериментальный ВКО со следующими параметрами:

- ротор с диаметром 160 мм и длиной 160 мм, материал — сталь 45;
- количество винтовых впадин ротора — 4;
- зубья отсекателя диаметром 30 мм, материал — бронза БР010Ф1;
- количество зубьев на отсекателе — 5;
- частота вращения ротора — 3000 об/мин;
- объемная производительность компрессора — 3,4 м<sup>3</sup>/мин;
- тип корпуса: сварной.

Для данного ВКО были разработаны конструктивные варианты регулировочного кольца (табл. 1)

Рассматриваемые варианты конструкции предполагают наличие пазов в области движения зубьев отсекателя, тем самым, не препятствуя работе отсекателей, в процессе поворота кольца. А также имеют разную толщину и ширину.

Таблица 1

Габариты регулировочного кольца, принятые к рассмотрению

Table 1

Dimensions of the adjustment ring under consideration

Вариант	Ширина $b$ , мм	Толщина $h$ , мм
1	a	37
	б	37
	в	37
2	a	47
	б	47
	в	47
3	a	60
	б	60
	в	60

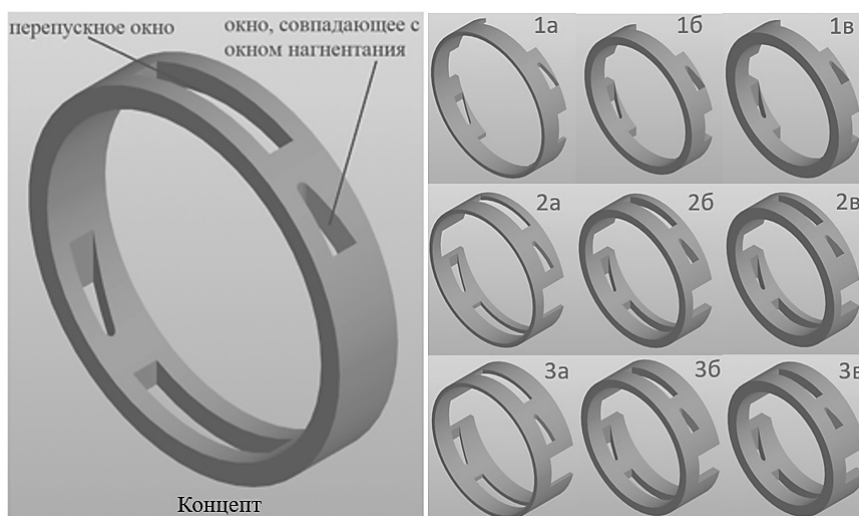


Рис. 1. Концепт внутреннего регулятора производительности ВКО и рассматриваемые варианты конструкции

Fig. 1. Concept of an internal capacity regulator for a screw single-rotor compressor and design variants under consideration

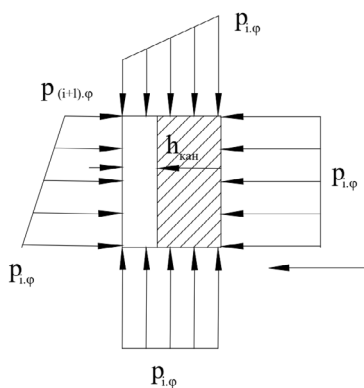


Рис. 2. Схема действия сил на поршневое кольцо компрессора [7]

Fig. 2. The action of forces on the piston ring [7]

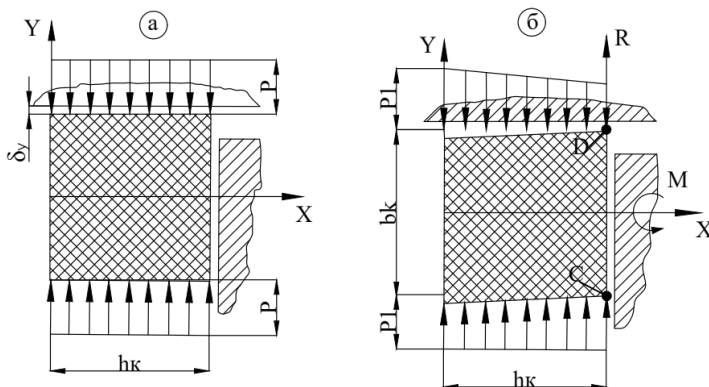


Рис. 3. Схема действия сил на поршневое кольцо компрессора [8]

Fig. 3. The action of forces on the piston ring [8]

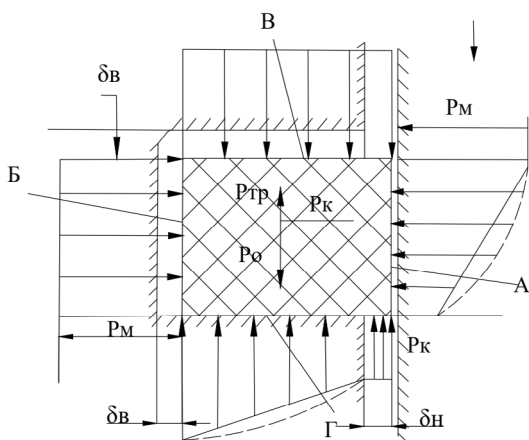


Рис. 4. Схема действия сил на поршневое кольцо компрессора [9]

Fig. 4. The action of forces on the piston ring [9]

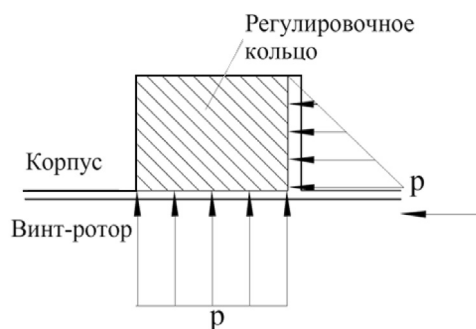


Рис. 5. Принятая схема действия газовых сил

Fig. 5. The action of gas forces

Для расчета силовых деформаций и напряжений необходимо задаться расчетной схемой действия газовых сил. Одним из аналогичных вариантов является действие газовых сил на уплотнительное кольцо поршневого компрессора. Однако литературные источники показывают, что у разных исследователей по теме, схемы нагрузок на данный узел различаются (рис. 2–4) [7]–[9].

Действие газовых сил на регулировочное кольцо в ВКО решено принять по следующей схеме: давление газа на внутреннюю поверхность кольца постоянное, на торец со стороны области всасывания — линейное (рис. 5).

Для проведения расчетов, была выбрана программа ANSYS, с положительной стороны зарекомендовавшая себя при исследовании рабочих процессов в винтовых машинах [10]–[14]. Результаты расчетов в модуле Static Structural ANSYS (рис. 6, табл. 2) показали, что для варианта 1 возникают наибольшие напряжения в зоне окна, совпадающего с окном нагнетания в области торца. В вариантах 2 и 3 значения меньше.

На данном этапе принимается вариант кольца 2б (рис. 7), так как данная конструкция: оптимальна с точки зрения расчета напряжений и деформации, металлоемкости; исключает необходимость в утолщении корпуса ВКО, при установке регулировочного кольца в расточ-

ку корпуса; имеет вырезы в зоне траектории движения зубьев отсекаелей (в отличие от концепта); имеет возможность создания конструкции привода регулятора, требующая в своем составе канавки клиновидной формы (находится в разработке) [15].

Таблица 2

Результаты расчетов силовых деформаций и напряжений для всех вариантов

Table 2

The results of calculations of force deformations and stresses for all variants

Вариант	Деформация, мкм	Напряжения, МПа
1	a	0,063
	б	0,097
	в	0,106
2	a	0,017
	б	0,037
	в	0,053
3	a	0,018
	б	0,037
	в	0,053

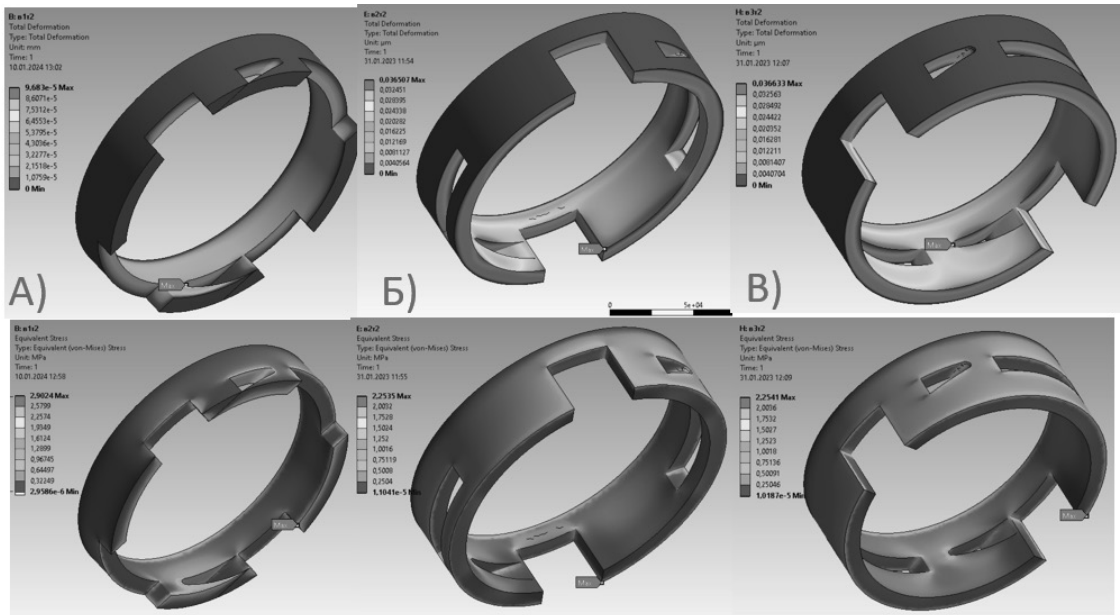


Рис. 6. Примеры распределения деформаций и напряжений:

а — вариант 1б; б — вариант 2б; в — вариант 3б (ANSYS, Static Structural). Материал Сталь Ст45

Fig. 6. Examples of strain and stress distribution:

а — variant 1b; б — variant 2b; в — variant 3b (ANSYS, Static Structural). Material — St 45 steel

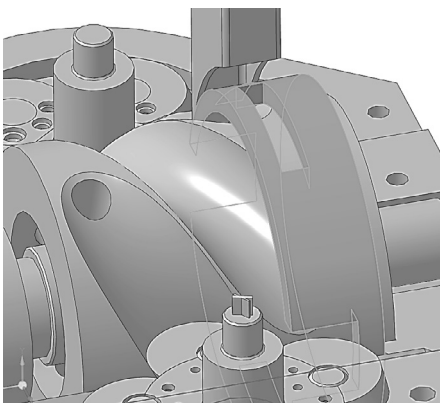


Рис. 7. Вариант конструкции регулировочного кольца 2б

Fig. 7. A design of 2b adjustment ring

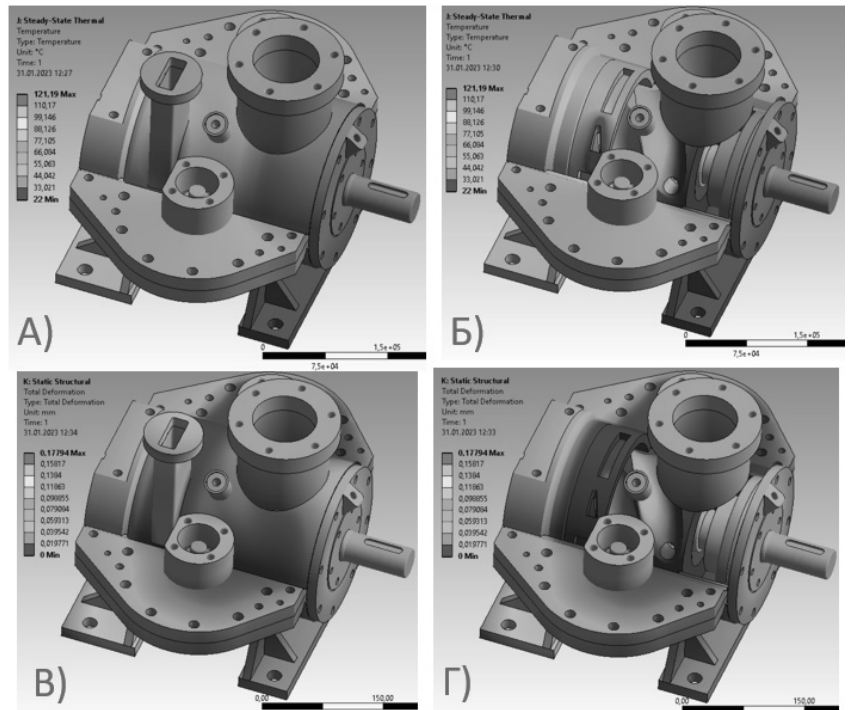


Рис. 8. Распределение температуры (ANSYS, Steady-State Thermal): а — поверхность ВКО;

б — ВКО со снятой крышкой, температурные деформации (ANSYS, Steady-State Thermal+Static Structural):

в — поверхность ВКО; г — ВКО со снятой крышкой

Fig. 8. Temperature distribution (ANSYS, Steady-State Thermal): а — the surface of a screw single-rotor compressor;

б — a screw single-rotor compressor with cover removed, temperature strain (ANSYS, Steady-State Thermal+Static Structural):

в — the surface of a screw single-rotor compressor; г — a screw single-rotor compressor with cover removed

Следующим этапом является задание рабочих зазоров между регулировочным кольцом и рабочими элементами в зоне регулирования производительности. Для этого были построены температурные поля в модуле Steady-State Thermal (рис. 8, а, б), граничными условиями являлось задание температуры всасывания 22 °С в плоскости

торца винта-ротора со стороны всасывания, температуры 120 °С на поверхности кромок окна нагнетания. Далее данные были переданы в Static Structural для расчета температурных деформаций (рис. 8, в, г).

Далее детально рассмотрены регулировочное кольцо, зуб отсекаателя, верхняя и нижняя крышки корпуса

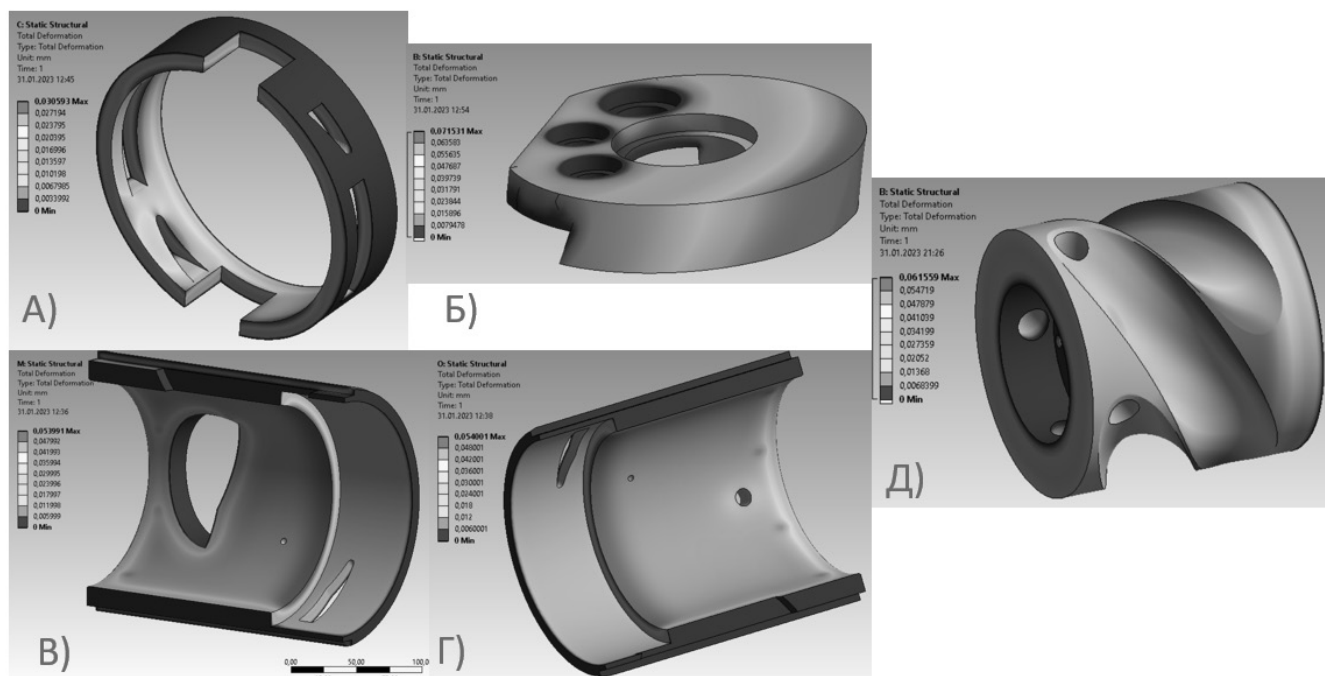


Рис. 9. Температурные деформации (ANSYS, Steady-State Thermal+Static Structural): а — регулировочное кольцо (сталь Ст45); б — зуб отсекателя (бронза БрО10Ф1); в — верхняя крышка корпуса (сталь Ст45); г — нижняя крышка корпуса (сталь Ст45); д — винт-роптор (сталь Ст45)

Fig. 9. Temperature strain (ANSYS, Steady-State Thermal+Static Structural): a — adjustment ring (St45 steel); б — cutter tooth (BrO10F1 bronze); в — top cover (St45 steel); г — bottom cover (St45 steel); д — screw rotor (St45 steel)

и винт-роптор. У данных элементов максимальные или близкие к максимальным температурные деформации возникают в зоне нагнетания. Результаты приведены на рис. 9.

Для предотвращения заклинивания в результате температурных деформаций, были назначены следующие зазоры (рис. 10):  $a_1$  — между внутренней поверхностью

регулирующего кольца и наружной поверхностью винта-роптора не менее 0,093 мм;  $a_2$  — между поверхностью выреза под зуб отсекателя в регулировочном кольце и поверхностью зуба отсекателя не менее 0,103 мм;  $a_3$  — между торцом регулировочного кольца и торцом проточки корпуса не менее 0,085 мм.

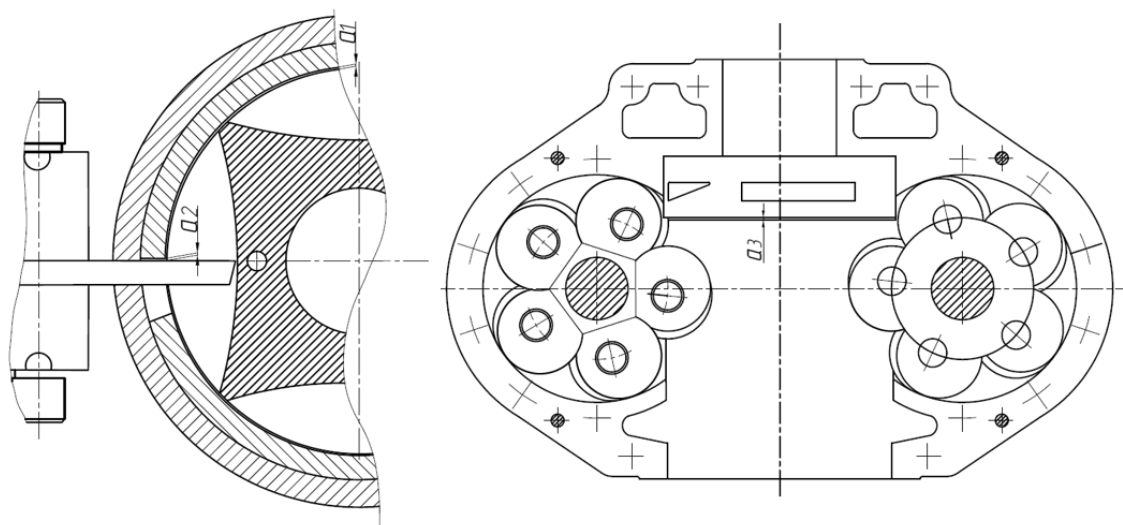


Рис. 10. Рассматриваемые зазоры:

- $a_1$  — внутренняя поверхность регулировочного кольца-наружная поверхность винта-роптора;
- $a_2$  — поверхность выреза под зуб отсекателя в регулировочном кольце-поверхность зуба отсекателя;
- $a_3$  — торец регулировочного кольца-торец проточки корпуса

Fig. 10. Clearances under consideration:  $a_1$  — inner surface of the adjustment ring- outer surface of the screw rotor;  $a_2$  — cut surface for the cutter tooth in the adjustment ring — cutter tooth surface;  $a_3$  — end surface of the adjustment ring — end surface of the body groove

## Верификация математической модели регулирования производительности ВКО при помощи регулировочного кольца на базе ANSYS

В рамках задачи верификации разработанной ранее математической модели (1) [6] необходимо выполнить следующие этапы:

- подготовка геометрической модели рассматриваемых конструктивных элементов ВКО для проведения САЕ-моделирования;
- моделирование в САЕ-системе ANSYS, рассмотрев алгоритм проведения расчета;
- сравнение результатов математического и САЕ-моделирования при заданных условиях работы ВКО.

Уравнение, описывающее значение теоретической объемной производительности ВКО в процессе ее регулирования поворотным регулировочным кольцом [6], представлено в виде:

$$V_{\text{регул}}(\beta) = V_{\text{полн}} - v_{\text{вс}} \sum_{\beta=\beta_{\text{л1}}}^{\beta_{\text{п4}}} \frac{zR_1\Delta\beta}{\omega} \cdot m_{\text{перепуск}}(\beta, \Delta x), \quad (1)$$

где  $V_{\text{полн}}$  — значение полной производительности ВКО, м<sup>3</sup>/мин;  $v_{\text{вс}}$  — удельный объем рабочего вещества в конце процесса всасывания, м<sup>3</sup>/кг;  $\beta$  — угол поворота отсекаателя, рад;  $\beta_{\text{п4}}$ ,  $\beta_{\text{л1}}$  — характерные углы поворота отсекаателя в реперных точках;  $z$  — число зубьев отсекаателя, шт;  $R_1$  — наружный радиус винта-ротора, мм;  $\omega$  — угловая скорость вращения винта, рад/с;  $m_{\text{перепуск}}$  — массовый расход газа, проходящего через перепускное отверстие, кг/с;  $\Delta x$  — ширина перепускного окна, мм.

Профильным модулем для решения задач газодинамики является модуль Fluent, для работы в котором была подготовлена необходимая геометрия во встроенном графическом редакторе SpaceClaim (рис. 11).

Были выделены интересующие нас объемы: объем окна нагнетания в регулировочном кольце, объем окна нагнетания в корпусе компрессора и объем патрубка

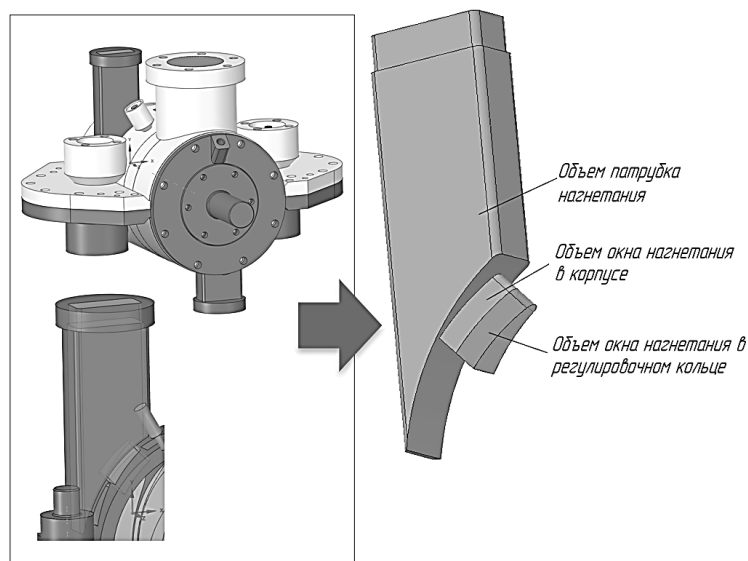


Рис. 11. САЕ-модели ВКО, нагнетательного патрубка, выделение расчетных геометрических объемов

Fig. 11. CAD-models of a screw single-rotor compressor, pressure outlet; identification of design geometric volumes

нагнетания. Также представлены изображения рассматриваемых элементов при различных углах поворота регулировочного кольца  $\alpha$  и площади пропускного сечения  $S_{\text{пер}}$  соответственно (рис. 12).

Следующим шагом является покрытие расчетной области сеткой конечных элементов. Так как геометрия состоит из нескольких характерных геометрических форм, они были разбиты по отдельности для их дальнейшего разбиения на элементы по отдельности с целью улучшения качества сетки (рис. 13). Тип элемента выбран Hex-20, а также ортогональная система построения. Как показывает анализ сетки (рис. 14), то для данной геоме-

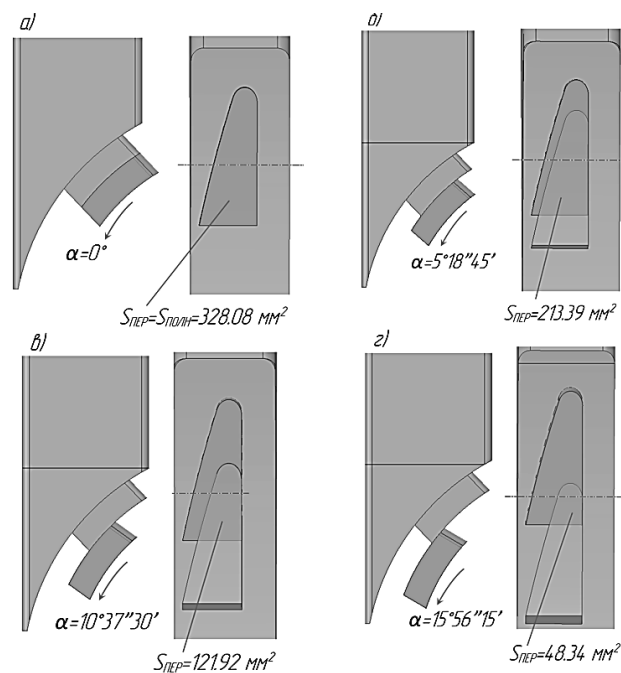


Рис. 12. Различные положения объема окна нагнетания на регулировочном кольце

Fig. 12. Positions of discharge port volume on the adjustment ring

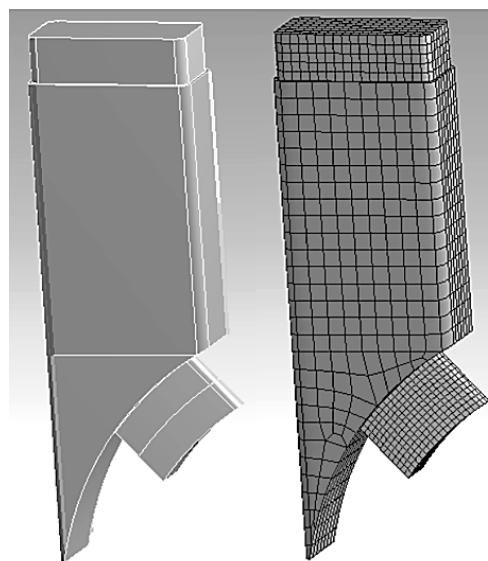


Рис. 13. Разбиение расчетной геометрии на характерные по форме объемы и сетку конечных элементов

Fig. 13. Partition of the computational geometry into shape-specific volumes and finite element mesh

трии и решения данного типа задач сетка выполнена во вполне приемлемом качестве. Количество «правильных» элементов с показателем Element metric равным 1 подавляющее большинство и в основном они сосредоточены в интересующей нас области, остальное количество не превышает показателя Element metric 0,7.

До начала инициализации решения необходимо внести некоторые данные. Базовыми являются следующие:

- рабочее давление  $p=0,7$  МПа;
- температура рабочей среды  $t=83$  °С;
- рабочая среда — воздух с параметрами при рабочих условиях: плотность  $\rho=6,844$  кг/м<sup>3</sup>, вязкость  $\mu=2,122115e-05$  кг/(м·с)

— модель турбулентности K-epsilon (k-ε);

Результаты моделирования показывают относительно постоянное давление в расчетной области. В случае при 100 % производительности (рис. 15, а) наиболее высокий показатель наблюдается в области противоположной стенки от окна нагнетания. А с увеличением угла поворота регулировочного кольца в нагнетательном патрубке давление стабилизируется, но более высокие значения наблюдаются в объеме нагнетательного окна регулировочного кольца (рис. 15, б-г).

Также сформированы изображения распределения скоростей потока в виде векторов (рис. 16), в различных случаях поворота регулировочного кольца, а также ли-

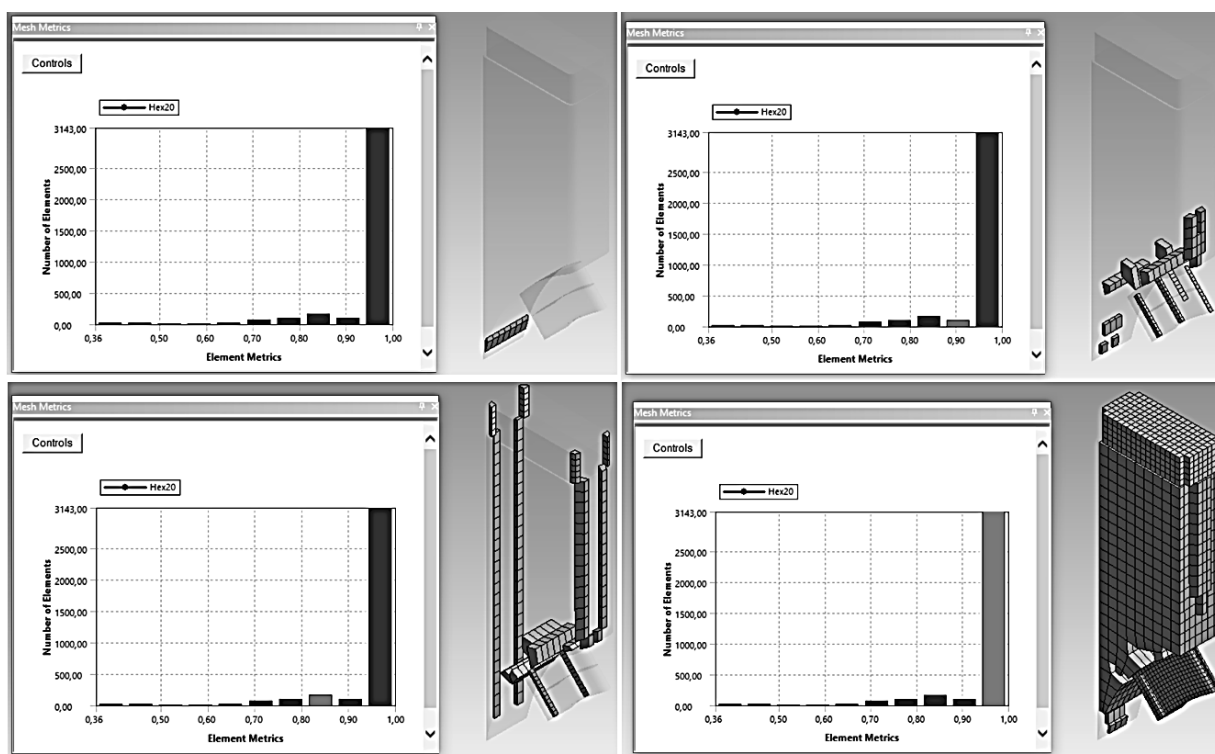


Рис. 14. Оценка качества сгенерированной сетки конечных элементов

Fig. 14. Quality evaluation for the generated finite element mesh

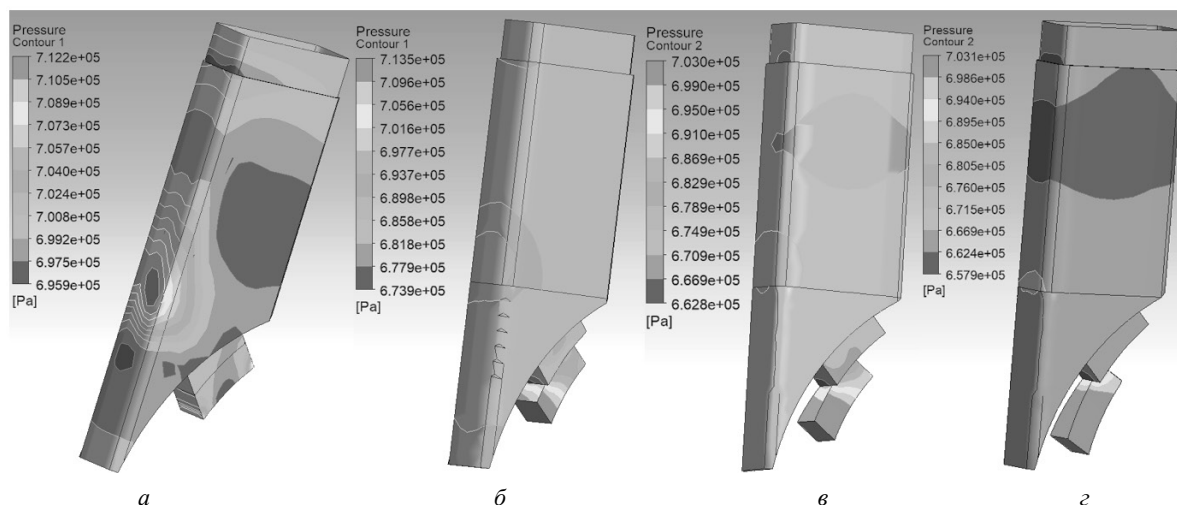


Рис. 15. Распределение давлений в расчетных моделях: а —  $\alpha=0^\circ$ ; б —  $\alpha=5^\circ 18' 45''$ ; в —  $\alpha=10^\circ 37' 30''$ ; г —  $\alpha=15^\circ 56' 15''$

Fig. 15. Pressure distribution in design models: а —  $\alpha=0^\circ$ ; б —  $\alpha=5^\circ 18' 45''$ ; в —  $\alpha=10^\circ 37' 30''$ ; г —  $\alpha=15^\circ 56' 15''$

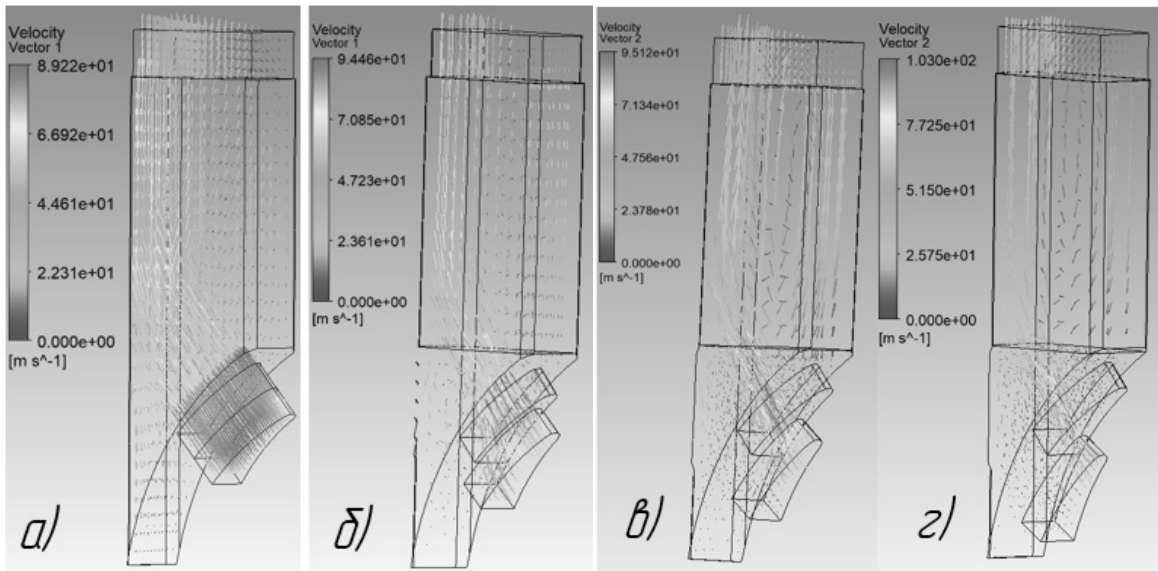


Рис. 16. Распределение скоростей потока рабочей среды в векторном виде:  
 а —  $\alpha=0^\circ$ ; б —  $\alpha=5^\circ 18' 45''$ ; в —  $\alpha=10^\circ 37' 30''$ ; г —  $\alpha=15^\circ 56' 15''$

Fig. 16. Vector distribution for the rates of working fluid flow:  
 а —  $\alpha=0^\circ$ ; б —  $\alpha=5^\circ 18' 45''$ ; в —  $\alpha=10^\circ 37' 30''$ ; г —  $\alpha=15^\circ 56' 15''$

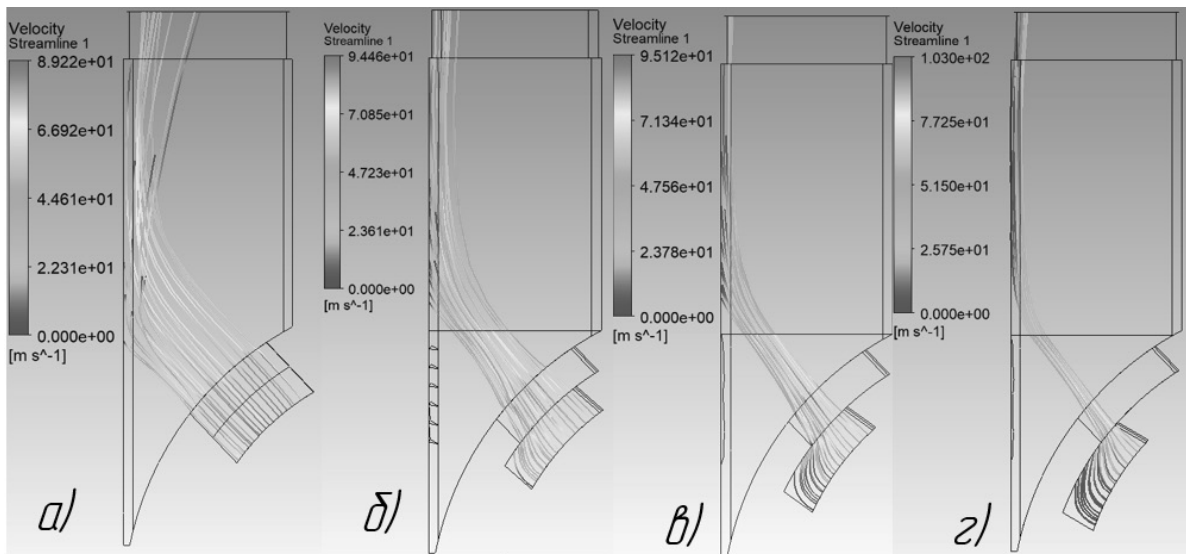


Рис. 17. Линии тока рабочей среды: а —  $\alpha=0^\circ$ ; б —  $\alpha=5^\circ 18' 45''$ ; в —  $\alpha=10^\circ 37' 30''$ ; г —  $\alpha=15^\circ 56' 15''$

Fig. 17. Working fluid flow lines: а —  $\alpha=0^\circ$ ; б —  $\alpha=5^\circ 18' 45''$ ; в —  $\alpha=10^\circ 37' 30''$ ; г —  $\alpha=15^\circ 56' 15''$

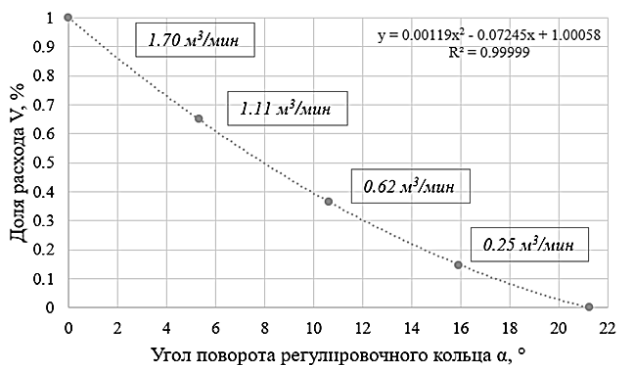


Рис. 18. Результаты математического моделирования  
 Fig. 18. Mathematical modelling results

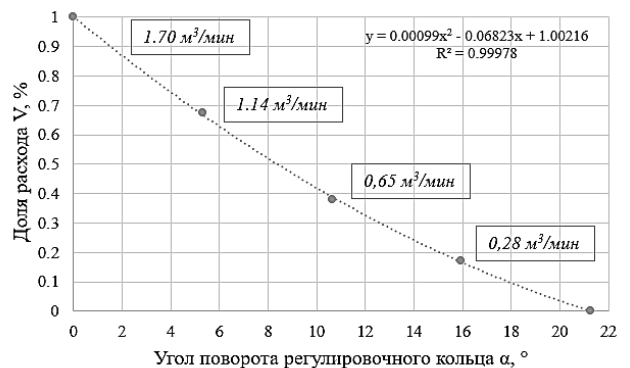


Рис. 19. Результаты CAE-моделирования  
 Fig. 19. CAE-modelling results



нии тока (рис. 17). Можно дать рекомендацию об изменении геометрических параметров патрубка нагнетания для предания большей прямолинейности потоку (рис. 17).

В результате, в графической форме представлены изменение объемной производительности ВКО в зависимости от угла поворота регулировочного кольца для математического моделирования (рис. 18) и моделирования в программе ANSYS (рис. 19) в аппроксимированной форме. Расхождения лежат в доверительном интервале.

### Заключение

В результате проведенного исследования была развита концепция нового типа встроенного регулятора ВКО (поворотное регулировочное кольцо), обоснован

наиболее предпочтительного вариант данной конструкции, основываясь на особенностях работы ВКО, а также моделировании силовых и тепловых деформаций на базе ANSYS. Произведена верификация математической модели регулирования производительности ВКО при помощи регулировочного кольца инструментами ANSYS. Предложенная конструкция регулятора производительности является перспективным встроенным устройством регулирования производительности ВКО. Дальнейшими направлениями развития данной тематики являются разработка оригинальной системы привода встроенного регулятора производительности, а также оценка его работы с точки зрения энергоэффективности.

### Литература

1. Филиппов И. В. Регулирование производительности винтовых компрессоров // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. № 9. с. 163–180.
2. Бараненко А. В., Бухарин Н. Н., Пекарев В. И., Тимофеевский Л. С. Холодильные машины: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур»; под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2006. 944 с.
3. Ануфриев А. В., Пекарев В. И. Влияние способа регулирования холодопроизводительности и внешних условий на эффективность винтового компрессора // Вестник Международной академии холода. 2008. № 2. С. 17–21.
4. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Zhignovskaia D. V. Methods for regulating the performance of screw compressors and features applications for single rotor machines // AIP Conference Proceedings, 2021, Vol. 2442, pp. 030040.
5. Однороторный винтовой компрессор: Патент 212922 Рос. Федерация: МПК7 F 04 C 18/52 / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Пронин В. А., Бураков А. В., Божедомов А. В., Цветков В. А. заявитель и патентообладатель АО «Компрессор», — заявл. 2022116811; опублик. 21.06.2022, Бюл. № 23.
6. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Kalashnikova E. A. Modelling of capacity regulation of single-rotor screw compressor using a rotary regulator ring // AIP Conference Proceedings, 2023, Vol. 2784, pp. 030027.
7. Прилуцкий А. И. Развитие теории, методов расчета и оптимального проектирования поршневых компрессорных и расширительных машин дис... д. т. н.: 05.04.03. СПб., 2015. 379 с.
8. Кузнецов Л. Г. Разработка и создание поршневых компрессорных и расширительных машин с сухим картером: дис... д. т. н.: 05.04.03. СПб., 2015. 449 с.
9. Захаренко В. П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки дис... д. т. н.: 05.04.03, 05.04.06. СПб., 2002. 341 с.
10. Liu F. Liao X., Feng Q., Van Den Broek M., De Paep M. Deformation analysis of the main components in a single screw compressor. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, Vol. 90. No. 1., pp. 012011.
11. Suman A., Ziviani D., Gabrielloni J., Pinelli M., De Paep M., Van Den Broek M. Different numerical approaches for the analysis of a single screw expander. // Energy Procedia, 2016, Vol. 101, pp. 750–757.

### References

1. Filippov I. V. Performance regulation of screw compressors. *Mechanical engineering and computer technologies*. 2013. No 9. P. 163–180. (in Russian)
2. Baranenko A. V., Bukharin N. N., Pekarev V. I., Timofeevsky L. S. Refrigerating machines: textbook. for university students studying in the specialty «Low temperature engineering and physics»; under the general editorship of L. S. Timofeevsky. 2nd Ed., reprint. St. Petersburg, Politechnika, 2006. 941 p. (in Russian)
3. Anufriev A. V., Pekarev V. I. Influence of the method of regulating cooling capacity and external conditions on the efficiency of a screw compressor. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2008. No 2. P. 17–21. (in Russian)
4. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Zhignovskaia D. V. Methods for regulating the performance of screw compressors and features applications for single rotor machines. *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2442. pp. 030040.
5. Screw single — rotor compressor: Patent of the Russian Federation 212922: MPK7 F 04 C 18/52 / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Y. L., Pronin V. A., Burakov A. V., Bozhedomov A. V., Tsvetkov V. A.; applicant and patent holder: JSC «Compressor», — application 2022116811; Publ. 21.06.2022, Byul. No. 23. (in Russian)
6. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Kalashnikova E. A. Modelling of capacity regulation of single-rotor screw compressor using a rotary regulator ring. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2784. pp. 030027.
7. Prilutskiy A. I. Development of theory, calculation methods and optimal design of reciprocating compressor and expansion machines: dis.doctor of technical sciences, St. Petersburg, 2015. 379 p. (in Russian)
8. Kuznetsov L. G. Development and creation of piston compressor and expansion machines with dry sump: dis.doctor of technical sciences, St. Petersburg, 2001. 379 p. (in Russian)
9. Zakharenko V. P. Bases of the theory of the seals and the establishment of reciprocating compressors without lubrication: dis.doctor of technical sciences, St. Petersburg., 2001. 341 p. (in Russian)
10. Liu F. Liao X., Feng Q., Van Den Broek M., De Paep M. Deformation analysis of the main components in a single screw compressor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 90. No. 1., pp. 012011
11. Suman A., Ziviani D., Gabrielloni J., Pinelli M., De Paep M., Van Den Broek M. Different numerical approaches for the analysis of a single screw expander. *Energy Procedia*, 2016, Vol. 101, pp. 750–757.

12. Zhang Z., Wu W. Numerical investigation of thermal deformation of meshing pairs in single screw compressor. // *Applied Thermal Engineering*, 2021. Vol. 188. pp. 116614.
13. Sham R., Ahmed K., Nikola S., Madhulika K. Grid deformation strategies for CFD analysis of screw compressors. // *International Journal of Refrigeration*. 2013. Vol. 36, No. 7, pp. 1883–1893.
14. Valand D., Bhabhor K. K., Jani D. B., Gandhi M. T., Prajapati M. B. Investigation of the Tooth Profile for Screw Compressor Considering Leakages by Simulating in CFD. // *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*. 2023. Vol. 3. No. 11. pp. 115–124.
15. Однороторный винтовой компрессор: Патент 221032 Рос. Федерация: МПК7 F 04 C 18/52 / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Пронин В. А., Бураков А. В., Цветков В. А., Кованов А. В. заявитель и патентообладатель АО «Компрессор», — заявл. 2023120622; опублик. 16.10.2023, Бюл. № 29.
12. Zhang Z., Wu W. Numerical investigation of thermal deformation of meshing pairs in single screw compressor. *Applied Thermal Engineering*, 2021, Vol. 188, pp. 116614.
13. Sham R., Ahmed K., Nikola S., Madhulika K. Grid deformation strategies for CFD analysis of screw compressors. *International Journal of Refrigeration*, 2013, Vol. 36, No. 7, pp. 1883–1893.
14. Valand D., Bhabhor K. K., Jani D. B., Gandhi M. T., Prajapati M. B. Investigation of the Tooth Profile for Screw Compressor Considering Leakages by Simulating in CFD. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, 2023, Vol. 3, No. 11, pp. 115–124.
15. Screw single — rotor o compressor: Patent of the Russian Federation 221032: МПК7 F 04 C 18/52 / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Y. L., Pronin V. A., Burakov A. V., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V.; applicant and patent holder: JSC «Compressor», — application 2023120622; Publ. 16.10.2023, Byul. No. 29. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Цветков Вадим Александрович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, wadimsvetkov@mail.ru

#### Пронин Владимир Александрович

Д. т. н., профессор, ординарный профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, maior.pronin@mail.ru

#### Иванов Лев Владимирович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, lvivanov@itmo.ru

#### Белов Павел Андреевич

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, mr.beloff99@gmail.com

### Information about authors

#### Tsvetkov Vadim A.

Graduate student of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, wadimsvetkov@mail.ru

#### Pronin Vladimir A.

D. Sc., Professor, Professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, maior.pronin@mail.ru

#### Ivanov Lev V.

Graduate student of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, lvivanov@itmo.ru

#### Belov Pavel A.

Graduate student of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, mr.beloff99@gmail.com



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»