

УДК 621.515.4

## Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора

А. Ф. МИНИКАЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук В. А. ПРОНИН<sup>2</sup>, Д. В. ЖИГНОВСКАЯ<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>artyr\_minikaev@mail.ru, <sup>2</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>3</sup>diana.zhignovskaya@gmail.com

Университет ИТМО  
Канд. техн. наук Ю. Л. КУЗНЕЦОВ  
yuriy\_spb@mail.ru  
АО «Компрессор»

*Рассмотрена история создания, применения и развития винтовых компрессоров на сегодняшний день. Описана проблема низкой эффективности и надежности работы винтовых однороторных компрессоров, проблема совершенствования профилей рабочих органов. Предложена система дифференциальных уравнений взаимного расположения рабочих органов винтового однороторного компрессора в вертикальных и горизонтальных плоскостях для определения положения любой точки на контуре зуба на отсекателе и на винте в системе неподвижных координатах. Рассмотрена связь между подвижными координатами винта и неподвижными координатами отсекавателя для бесконечно тонкого отсекавателя. Установлено, что для определения координат любой точки, которая находится на зубе отсекавателя бесконечно малой толщины и для любой точки впадины винта позволяет определить координаты полученной системой уравнений. Обосновано применение компьютерного моделирования и булевых операций для создания беззазорного соединения между рабочими органами винтового однороторного компрессора методом виртуальной обкатки. Полученные результаты расчета уравнений связи между подвижными координатами винта и неподвижными координатами отсекавателя, и результаты компьютерного моделирования дают возможность использования CAD/CAM-систем для профилирования рабочих органов винтовых однороторных компрессоров с беззазорным и с зазорным соединением.*

**Ключевые слова:** винтовой однороторный компрессор, 3D-моделирование, CAD/CAM системы, 3D принтер, булевые операции.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 16.11.2017, принята к печати 02.03.2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-1-61-66

Язык статьи — русский

### Ссылка для цитирования:

Миникаев А. Ф., Пронин В. А., Жигновская Д. В., Кузнецов Ю. Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 61–66.

## The use of computer modelling for the development of the working bodies' profiles for screw single-rotor compressor

A. F. MINIKAYEV<sup>1</sup>, D. Sc. V. A. PRONIN<sup>2</sup>, D. V. ZHIGNOVSKAYA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>artyr\_minikaev@mail.ru, <sup>2</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>3</sup>diana.zhignovskaya@gmail.com

ITMO University  
Ph. D. Yu. L. KUZNETSOV  
yuriy\_spb@mail.ru  
«Compressor» JSC

*The history of creation, application, and development of screw compressors is considered. The problem of low efficiency and reliability of screw single-rotor compressors operation and the problem of improving the profiles of working bodies are described. A system of differential equations for the mutual arrangement of the working bodies of a screw single-rotor compressor in vertical and horizontal planes is proposed to determine the position of any point on the contour of the tooth on the cutter and on the screw in a fixed coordinate system. The relationship between the moving coordinates of the screw and the fixed coordinates of the cutoff for an infinitely thin cut-off is considered. It is established that to determine the coordinates of any point on the cutter tooth of infinitely small thickness and for any point of the cavity of the screw it is possible to determine the coordinates of the resulting system of equations. The use of computer modeling and Boolean operations to create gapless connection between the working bodies of a screw-type single-rotor compressor by virtual break-*

*in method is justified. The calculation results of the coupling equations between the moving coordinates of the screw and the fixed coordinates of the cutter, as well as and computer modeling results, allow using CAD/CAM-systems for profiling the working parts of screw single-rotor compressors with both gapless and gap connection.*

**Keywords:** screw single-rotor compressor, 3D-modeling, CAD / CAM systems, 3D printer, Boolean operations.

#### Article info:

Received 16/11/2017, accepted 02/03/2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-1-61-66

Article in Russian

#### For citation:

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.

## Введение

Винтовые компрессоры, являются машинами объемного сжатия т.е. компримирование рабочих сред [1] происходит в результате объемного уменьшения в зонах, которые отсекаются рабочими органами. В действительности, принцип работы винтовых компрессоров известен более 140 лет, однако широкое применение винтовые компрессоры получили только в последние 60 лет [2]. Главными причинами этому были относительно высокая стоимость производства рабочих органов и низкий коэффициент полезного действия (КПД).

Значительный вклад в разработку винтовых компрессоров внес известный шведский инженер Альф Джеймс Рудольф Лисхольм. В 1936 г. ему удалось запатентовать винтовой компрессор, взяв за основу главную идею братьев Рутс. Объединив в одном корпусе не роторы в форме восьмерок, а так называемые, шнеки зеркального типа, определив их как ротор ведущий и ведомый, он также модернизировал окно нагнетания, перенес его основную часть с боковой поверхности корпуса на торец. При вращении двух винтов, они всасывают рабочую среду, далее происходит сжатие в замкнутом объеме и вытеснение в полость нагнетания [3]. Испытание показало, что КПД устройства достаточно высокое, по сравнению с компрессором братьев Рутс, и работает оно плавно, исключая пульсацию и скачки давления. Лисхольм использовал первый прототип винтового компрессора в качестве газовой турбины, т. о. винтовые машины обладают свойством обратимости [4].

В дальнейшем, разработки в области винтовых машин позволили решить проблемы, связанные с удешевлением изготовления. Введение ассиметричного профиля для винтов позволило существенно уменьшить площади полостей, которые становились причиной протечек внутри компрессора, что привело к повышению термодинамического КПД [5], приблизив его к уровню поршневых компрессоров. В настоящее время выпускаются винты самых различных профилей.

Винтовые компрессоры на сегодняшний день нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Отличительной чертой этих машин является способность регулирования производительности в низком диапазоне, одновременно с уменьшением потребляемой мощности при частичной нагрузке [6].

Винтовые компрессоры, по сравнению с поршневыми машинами, имеют более широкий диапазон рабочих

параметров и более низкие затраты, связанные с их техническим обслуживанием. Компрессоры этого типа при работе создают меньший уровень шума и вибрации, также они гораздо меньше по размеру, чем поршневые компрессоры.

В настоящий период винтовые машины получили широкое применение в сферах пищевой промышленности, нефтехимии, газопереработке и в секторе нефтяной промышленности [7]. Одной из областей широкого использования винтовых компрессоров является холодильная техника с применением различных хладагентов.

Винтовые машины могут выполняться в двух вариантах: сухого сжатия и маслозаполненным. Уже в конце 50-х годов XX века была разработана технология применения масла в винтовых машинах, что дало большой импульс для введения этой технологии повсеместно.

Так называемые компрессоры бесмасляные или компрессоры «сухого» сжатия используются для компримирования технологических газов, которые не допускают попадания масла в рабочую среду. В ряде случаев в рабочей полости винтового компрессора может впрыскиваться охлаждающая жидкость [9].

Спустя несколько десятилетий Б. Зиммерн впервые запатентовал компрессор винтовой однороторный (ВКО) [8]. Главным отличием которого являлось изменение в классической конструкции, предложенной Лисхольмом, а именно заменой ведомого ротора двумя отсекателями, расположенными с двух сторон ведущего ротора винта. В результате модернизации конструкции, новый компрессор получил не одну полость нагнетания, как в двухроторном компрессоре, а две. Уже в конце 80-х годов XX века был изготовлен и запатентован ВКО с новой окружной формой зуба, в то время как все машины, выпускаемые зарубежными фирмами, имеют прямоугольный профиль зуба отсекателя [9].

## Цели исследования

Целью исследования данной работы является получение профиля контура зуба с помощью численной методики определения координат рабочих поверхностей зуба, так как в настоящее время определенные трудности вызывает оптимизация зазоров между центральным ротором и зубьями отсекателей. Для повышения КПД, уменьшения протечек и оптимизации зазоров находится сопряженный профиль и линия зацепления зубьев отсе-

кателя с ротором с помощью систем автоматизированного проектирования.

**Методика расчета**

В качестве исходного профиля контура для проектирования рабочих органов ВКО, была предложена окружность, которая нарезает винт токарным и фрезерным способом, если рабочая кромка режущего инструмента лежит в плоскости, проходящей через ось вращения заготовки.

Далее представлена методика определения координат рабочих поверхностей зуба отсекаателя к впадине винта.

Рассмотрим взаимное размещение рабочих органов ВКО в вертикальной и горизонтальных плоскостях [10]. Координаты  $x_1, o_1, y_1, z_1$  связаны с винтом, а координаты  $x_2, o_2, y_2, z_2$  — с отсекателем. Посередине оси нарезной части винта имеется начало координат первой системы  $o_1$ , а на оси вращения отсекаателя в плоскости (рис. 1, а) расположено начало координат  $o_2$ , проходящей через винтовую ось вращения [11]. Вводим обозначения рабочих органов:

$D_{e1}$  и  $D_{e2}$  — наружные диаметры отсекаателя и винта;

$D_{H2}$  — диаметр начальной окружности зубьев отсекаателя;

$a_w$  — межосевое расстояние;

$r_0$  — радиус зуба отсекаателя в плоскости, проходящей через ось вращения винта.

Выберем произвольную точку  $M$  на контуре зуба отсекаателя (рис. 1, б), положение которой определяется углом по оси симметрии зуба [12]. Положительное направление отсчета угла  $\alpha$  начинается против часовой стрелки. Повернем отсекатель по его оси вращения против часовой стрелки на некоторый угол  $\varphi$ , из этого следует поворот винта на угол  $\tau_1$ . Следовательно связь между углами можно записать в виде  $\tau_1 = \varphi_2 \frac{z_2}{z_1}$ , где  $z_1$  и  $z_2$  — числа зубьев винта и отсекаателя, соответственно. При этом система координат  $x'_1, y'_1, z'_1$  также жестко связана с винтом, а система  $x'_2, y'_2, z'_2$  связана с отсекателем.

Для определения положения любой точки  $M$  на контуре зуба отсекаателя в системе координатах  $x'_2, y'_2, z'_2$  можно определить с помощью уравнений:

$$\begin{cases} y'_2 = \frac{D_{H2}}{2} + r_0 \cos \alpha; \\ x'_2 = r_0 \sin \alpha, \end{cases} \text{ при } z'_2 = 0 \quad (1.1)$$

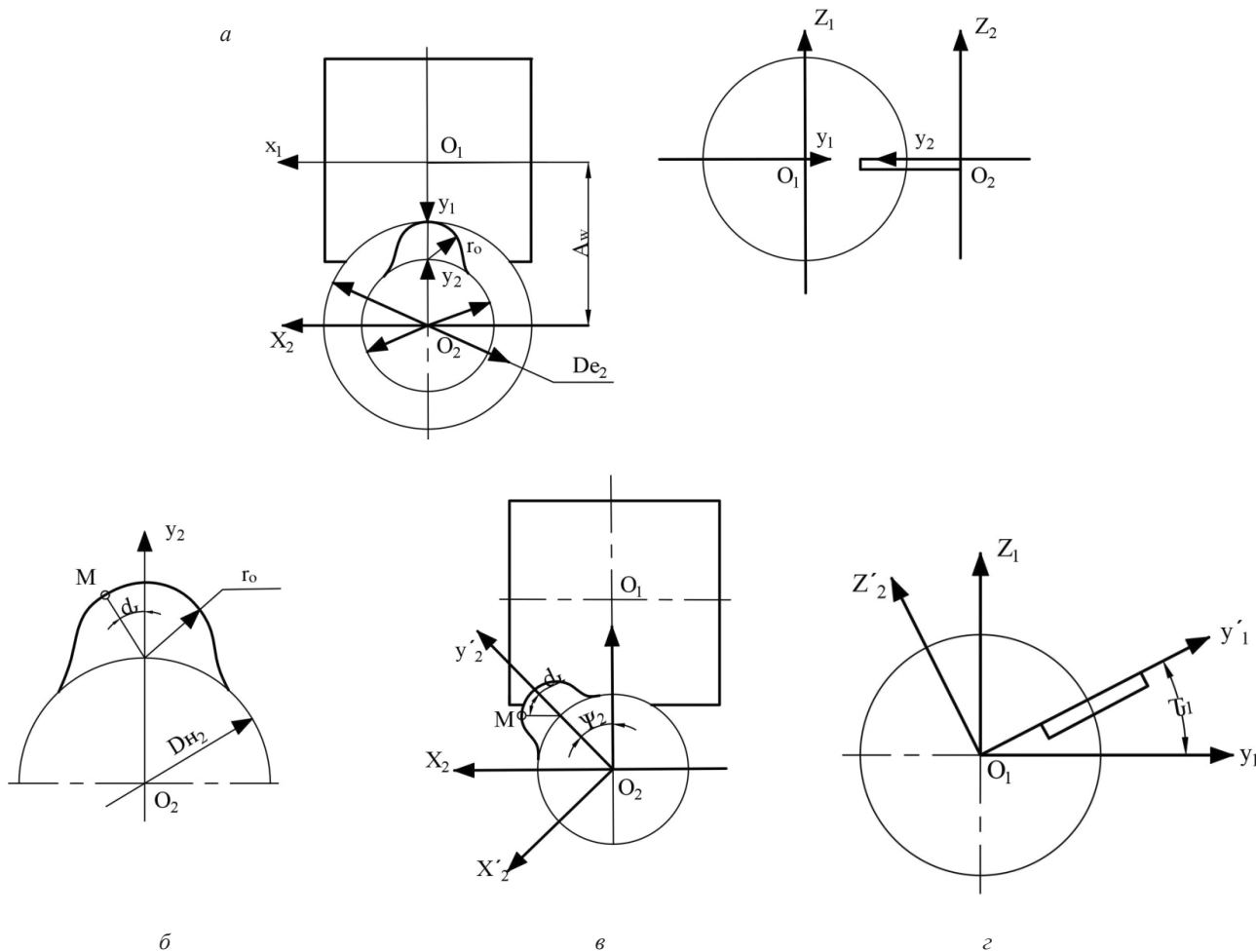


Рис. 1. Взаимное расположение рабочих органов ВКО  
 Fig. 1. Mutual arrangement of the working bodies of screw single-rotor compressor

Положение точки  $M$  в системе неподвижных координат  $x_2, y_2, z_2$  при повороте отсекателя на угол  $\varphi_2$  (рис. 1, г) можно определить с помощью уравнений:

$$\begin{cases} y_2 = -x'_2 \sin \varphi_2 + y'_2 \cos \varphi_2; \\ x_2 = x'_2 \cos \varphi_2 + y'_2 \sin \varphi_2, \end{cases} \quad (1.2)$$

или, после подстановки (1.1) в (1.2), как уравнения

$$\begin{cases} y_2 = -r_0 \sin \varphi_2 \sin \alpha + \frac{D_{H2}}{2} \cos \varphi_2 + r_0 \cos \alpha \cos \varphi_2; \\ x_2 = r_0 \cos \varphi_2 \cos \alpha + \frac{D_{H2}}{2} \sin \varphi_2 + r_0 \cos \alpha \sin \varphi_2. \end{cases} \quad (1.3)$$

Далее рассмотрим связь между подвижными координатами винта и неподвижными координатами отсекателя (рис. 1, в, г) при помощи уравнения

$$\begin{cases} x'_1 = x_2; \\ y'_1 = a_w - y_2, \end{cases} \quad (1.4)$$

или

$$\begin{cases} x'_1 = r_0 \sin \alpha \cos \varphi_2 + \left( \frac{D_{H2}}{2} + r_0 \cos \alpha \right) \sin \varphi_2; \\ y'_1 = a_w + r_0 \sin \alpha \cos \varphi_2 - \left( \frac{D_{H2}}{2} + r_0 \cos \alpha \right) \cos \varphi_2. \end{cases} \quad (1.5)$$

Теперь от подвижных координат винта  $x'_1, y'_1, z'_1$  (рис. 1, г) перейдем к его неподвижным координатам  $x_1, y_1, z_1$ . Связь этих координат можно представить в виде:

$$\begin{cases} x_1 = x'_1; \\ y_1 = y'_1 \cos \tau_1 - z'_1 \sin \tau_1; \\ z_1 = y'_1 \sin \tau_1 - z'_1 \cos \tau_1. \end{cases} \quad (1.6)$$

При рассмотрении бесконечно тонкого отсекателя ( $\delta = 0$ ),  $z'_1 = 0$  и система уравнений (1.6) имеет вид:

$$\begin{cases} x_1 = x'_1; \\ y_1 = y'_1 \cos \tau_1; \\ z_1 = y'_1 \sin \tau_1. \end{cases} \quad (1.7)$$

После подстановки системы уравнений (1.5) в (1.6), получим следующие выражения, которое позволяет определить координаты любой точки, находящейся на зубе отсекателя бесконечно малой толщины и для любой точки впадины винта:

$$\begin{cases} x_1 = r_0 \sin \alpha \cos \varphi_2 + \left( \frac{D_{H2}}{2} + r_0 \cos \alpha \right) \sin \varphi_2; \\ y_1 = \left[ a_w + r_0 \sin \alpha \cos \varphi_2 - \left( \frac{D_{H2}}{2} + r_0 \cos \alpha \right) \cos \varphi_2 \right] \cos \left( \varphi_2 \frac{z_2}{z_1} \right); \\ z_1 = \left[ a_w + r_0 \sin \alpha \cos \varphi_2 - \left( \frac{D_{H2}}{2} + r_0 \cos \alpha \right) \cos \varphi_2 \right] \sin \left( \varphi_2 \frac{z_2}{z_1} \right). \end{cases} \quad (1.8)$$

Если принимать  $z_1 = z_2$  — для беззазорного зацепления, то при помощи данной системы уравнений (1.8) получаем координаты любой точки на боковой поверхности зуба отсекателя [13].

Целесообразно решать данную задачу численным способом, разбивая контур на участки с заданным шагом по  $\alpha$  и получая при этом координаты базовых точек рабочих органов ВКО для всего диапазона  $\varphi_2$ . Для облегчения и ускорения расчетов используется CAD/CAM-системы.

На сегодняшний день, винтовые компрессоры — это продукт высокотехнологического исполнения. Значительный вклад в повышение КПД, уменьшение протечек, оптимизации зазоров, оптимизации рабочих органов вносят на стадии проектирования технические науки, такие как математический анализ и компьютерное моделирование.

С развитием ЭВМ вырос спрос на всевозможные методы компьютерного моделирования, базирующиеся на использовании графических и расчетных модулей CAD/CAM-систем. Анализ известных решений свидетельствует об эффективности использования этих систем при проектировании рабочих органов ВКО, а также специального режущего инструмента для их изготовления [14]. Особенно это важно, когда возникают потребности установления пространственно-временных геометрических зависимостей между вращающимися рабочими органами ВКО.

Получение геометрии винтовой части роторов ВКО происходит в процессе проектирования компрессоров, где важную роль играют вопросы подбора геометрий и оптимизированных профилей рабочих органов ВКО.

В связи со сложной формой профилей рабочих органов ВКО появляется необходимость введения оптимальных методик исследований зацепления и оптимизации для центрального ротора и зубьев отсекателя [15]. Принцип основывается на использовании таких CAD-программ как AutoCAD, SOLIDWORKS, КОМПАС-3D и т. д.

К новому профилю предъявляются требования связанные с экономичностью изделия, его массогабаритными показателями, оптимизацией зазоров, соблюдением требований герметичности и т. д. Определенные трудности вызывает оптимизация зазоров между центральным ротором и зубьями отсекателей. Получение аналитических расчетов таких зацеплений весьма сложно, поэтому для решения и оптимизации этой задачи целесообразно применять САМ/САД-системы [16].

Согласно теории профилирования, в первую очередь моделируются рабочие органы с нулевым зазором, с так называемым беззазорным зацеплением, и только потом вводятся необходимые зазоры между ними. Теория зацепления для зубчатых колес не отличается от теории зацепления для рабочих органов ВКО. Следовательно, задачу пространственного вида лучше привести к двухмерной задаче, рассчитать и найти сопряженный профиль, а именно зубья отсекателя по выбранному профилю ротора ВКО и найти линию их зацепления. Линия зацепления определяется с помощью систем автоматизированного проектирования в 3D виде.

## Результаты и обсуждения

Результаты проведенных расчетов позволяют утверждать, что моделирование рабочих органов ВКО в среде САМ/САД и процесса обкатки позволяет решить задачу профилирования новых рабочих органов ВКО быстрее и проще, но только при соблюдении высокой точности

изготовления, которую могут обеспечить станки с числовым программным управлением и 3D-принтеры.

Технология основывается на компьютерном моделировании процессов обкатки виртуальным режущим инструментом, это может быть нарезание винта ВКО с окружным профилем винтовых полостей (рис. 2) посредством режущего инструмента, имеющего возможность вращения относительно продольной оси и впоследствии, при использовании булевой операции в каждой точке контакта, происходит вычитание одной 3D модели из другой. Для зубьев отсекателя данный метод также применим, только в этом случае, сам ротор будет являться виртуальным режущим инструментом, используемым для обкатки зубьев отсекателя во время его движения.

Описанная технология универсальна и является независимой от аналитических формул алгоритма поверхности ротора ВКО [17], что делает ее применимой для любых операций, где существует необходимость решения задачи сопряжения рабочих органов профилей.

Основным условием предложенной модели является то, что для каждой точки исходного профиля подбирается сопряженная ей точка на модели, полученная после операции обкатки. Соединение таких моделей возможно только при условии, когда общая нормаль для данных моделей, проходит через полюс зацепления [18].

На рис. 2 представлена 3D модель последовательной обкатки профиля, зуба отсекателя с помощью первичной формы винта.

Технология процессов проектирования состоит из расчета, создания 3D-моделей, оптимизации с помощью булевых операций, создания моделей в универсальных форматах, рабочих чертежей, написание в среде САМ-систем программ для станка с ЧПУ или модели для 3D-принтера. Комплексный подход к объединению этих технологий и операций в значительной степени сокращает время выхода ВКО на современный рынок. Написание технологии должно базироваться на расчете рабочих процессов, происходящих в ВКО и обеспечении обратных связей с конструктивными и геометрическими параметрами [19].

После заключений экспертов, технологов и создания макета, начинается работа по созданию опытного образца с новым профилем рабочих органов ВКО. Проводится согласование расчетных характеристик с необходимыми

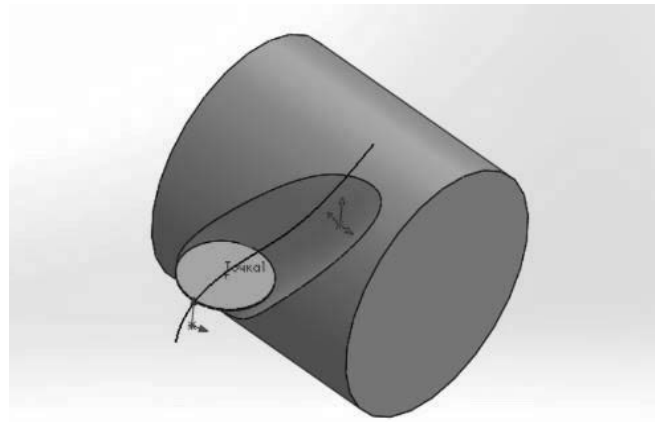


Рис. 2. Модель ротора ВКО полученная с помощью виртуального режущего инструмента

Fig. 2. The model of screw compressor rotor made by virtual cutter

зазорами между ротором и зубьями отсекателей, разработка технологической документации, программ для станков с ЧПУ и 3D-принтеров, подготовка технологической оснастки.

## Выводы

По результатам проведенного исследования рассмотрена связь между подвижными координатами винта и неподвижными координатами отсекателя для бесконечно тонкого отсекателя. Установлено, что для определения координат любой точки, которая находится на зубе отсекателя бесконечно малой толщины и для любой точки впадины винта позволяет определить координаты полученной системой уравнений. Обосновано применение компьютерного моделирования и булевых операций для создания беззазорного соединения между рабочими органами винтового однороторного компрессора методом виртуальной обкатки. Приведенные результаты расчета уравнений связи между подвижными координатами винта и неподвижными координатами отсекателя, а также компьютерного моделирования, дают возможность использования САД/САМ-систем для профилирования рабочих органов винтовых однороторных компрессоров с беззазорным и с зазорным соединением.

## Литература

1. Сакун И. А. Винтовые компрессоры: Основы теории, методы расчета, конструкции. — Л.: Машиностроение, 1970. 400 с.
2. Heinz P. Bloch. A Practical Guide to Compressor Technology, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2006. 590 p.
3. Pan J. 3D bioprinting of tissues and organs. // *Nature Biotechnology*. 2014. No 32, p. 773–785.
4. Freedman D. H. Layer By Layer. // *Technology Review*. 2015. No 115. p. 50–53.
5. Пронин В. А., Крапивко П. В., Миникаев А. Ф. Профилирование зуба окружной формы отсекателя однороторного винтового компрессора // Сборник тезисов докладов VI Всероссийского конгресса молодых ученых. — СПб.: Университет ИТМО, 2017. С. 1.
6. Пронин В. А., Пекарев В. И. Однороторные винтовые компрессоры // *Холодильная техника*. 1982. № 10. с. 56–57.

## References

1. Sakun, I. A. Screw compressors: theory, calculation methods, design. — L.: Engineering, 1970. 400 p. (in Russian)
2. Heinz P. Bloch. A Practical Guide to Compressor Technology, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2006. 590 p.
3. Pan J. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*. 2014. No 32, p. 773–785.
4. Freedman D. H. Layer By Layer. *Technology Review*. 2015. No 115. p. 50–53.
5. Pronin V. A., Krapivka, V. P., Minyaev A. F. profiling the circumferential tooth shape blade single-rotor screw compressor. *Collection of theses of reports of VI all-Russian Congress of young scientists*. SPb, ITMO University, 2017. p. 1. (in Russian)
6. Pronin V. A., Pekarev V. I. Single-rotor screw compressors. *Kholodilnaya tekhnika*. 1982. No. 10. p. 56–57. (in Russian)

7. А. С. 1813924 СССР / Пронин В. А., Ден Г. Н., Новиков И. И. Однороторная винтовая машина; опубл. в Б. И., 1992, № 23.
8. Chen N. Aerothermodynamics of Turbomachinery — Analysis and Design. Singapore, John Wiley & Sons, 2011. p. 448.
9. Сакун И. А. О повышении эффективности винтовых компрессоров холодильных машин // Холодильная техника. 1981. № 6. с. 18–21.
10. Пронин В. А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики: дис. . . д. т. н. — СПб., 1998. 226 с.
11. Ухин Б. В. Гидравлические машины. Насосы, вентиляторы, компрессоры и гидропривод. Учебное пособие. — М.: Инфра-М, Форум, 2016. 320 с.
12. Excell J. The rise of additive manufacturing. // The Engineer. Retrieved. 2013. С. 31–56.
13. Bloch H. P., Hoefner J. J. Reciprocating Compressors: operation and maintenance. Gulf Professional Publishing. 2013.
14. Tian F., Tao K., and Shao J. The Research on Meshing Pair Profile of Single-Screw Compressor, IEEE Computer Society, Wuhan, China, 2010.
15. Миникаев А. Ф., Ережеп Д. Сравнительные характеристики двухроторных и однороторных компрессоров // Сборник тезисов докладов V Всероссийского конгресса молодых ученых. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. С. 1.
16. Болшаков В. П. Твердотельное моделирование деталей в САД-системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. — СПб.: Питер, 2015. 480 с.
17. Онучин М. Ф., Давыдов В. А. Новые профили зубьев роторов винтовых компрессоров // Экспресс-информация. Сер. XM-5 (зарубежный опыт). — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1986. с. 1–4.
18. Карачаровский В. Ю., Рязанов С. А. Обобщенная модель твердотельного зуборезного инструмента с изменяемой кривизной производящей поверхности // В сборнике материалов Поволжской науч.-метод. конф. «Проблемы геометрического компьютерного моделирования в подготовке конструкторов для инновационного производства» — Саратов: СГТУ, 2010. С. 152–156.
19. Миникаев А. Ф., Долговская О. В., Пронин В. А. К вопросу протечек компримируемой среды в рабочей части однороторного винтового компрессора (ВКО) с окружной формой зуба // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 43–46.
7. Copyright Certificate. 1813924 USSR / Pronin V. A., Dan G. N., Novikov I. I. single-rotor screw machine; publ. in B. I., 1992, No. 23. (in Russian)
8. Chen N. Aerothermodynamics of Turbomachinery — Analysis and Design. Singapore, John Wiley & Sons, 2011. p. 448.
9. Sakun, I. A. improving the efficiency of screw compressors of refrigeration equipment. *Kholodilnaya Tekhnika*. 1981. No. 6. p. 18–21. (in Russian)
10. Pronin V. A. single-rotor Screw compressors for refrigeration and Pneumatics: dis. doctor of technical Sciences, St. Petersburg., 1998. 226 p. (in Russian)
11. Ukhin B. B. Hydraulic machines. Pumps, fans, compressors and hydraulic drive. Textbook. Moscow, Infra-M, Forum, 2016. 320 p. (in Russian)
12. Excell J. The rise of additive manufacturing. *The Engineer*. Retrieved. 2013. C. 31–56.
13. Bloch H. P., Hoefner J. J. Reciprocating Compressors: operation and maintenance. Gulf Professional Publishing. 2013.
14. Tian F., Tao K., and Shao J. The Research on Meshing Pair Profile of Single-Screw Compressor, IEEE Computer Society, Wuhan, China, 2010.
15. Minikayev A. F., Erejep D. Comparative characteristics of the dual rotor and single-rotor compressors. Abstracts of reports of V all-Russian Congress of young scientists. SPb, ITMO University, 2016. p. 1. (in Russian)
16. Bolshakov V. P. Solid modeling parts in CAD-systems: AutoCAD, COMPASS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. SPb.: Piter, 2015. 480 p. (in Russian)
17. Onuchin, M. F., Davydov V. A. a New tooth profiles of the rotors of screw compressors. Express-information. Ser. XM-5 (foreign experience). Moscow, 1986. p. 1–4. (in Russian)
18. Karacharovsky V. Yu., Ryzanov S. A. Generalized model of solid-state gear-cutting tool with variable curvature of the generating surface. Collected materials of Povolzhskaya scientific-method. Conf. «Problems of geometric computer modeling in the training of designers for innovative production». Saratov: SGTU, 2010. P. 152–156. (in Russian)
19. Minikayev A. F., Dolgovskaya, O. V., Pronin V. A. To the question of leaks of compressible medium in the working part of single screw compressor (ASD) with a peripheral tooth form. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2016. No. 3. p. 43–46. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Миникаев Артур Фаилевич

аспирант кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, artur\_minikaev@mail.ru

#### Пронин Владимир Александрович

д.т. н., профессор, заведующий кафедрой инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, maior.pronin@mail.ru

#### Жигновская Диана Валерьевна

магистрант кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, diana.zhignovskaya@gmail.com

#### Кузнецов Юрий Леонидович

к.т.н, директор АО «Компрессор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 64, yuriy\_spb@mail.ru

### Information about authors

#### Minikayev Artur Failevich

postgraduate student of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, artur\_minikaev@mail.ru

#### Pronin Vladimir Aleksandrovich

D. Sc., professor, head of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, maior.pronin@mail.ru

#### Zhignovskaya Diana Valer'yevna

undergraduate of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, diana.zhignovskaya@gmail.com

#### Kuznetsov Yuriy Leonidovich

Director of JSC «Compressor», 194044, Russia, St. Petersburg, Bol'shoy Sampsoniyevskiy pr., 64, yuriy\_spb@mail.ru