

УДК 621.514.5

Аналитический обзор способов регулирования производительности винтовых компрессоров

Д-р техн. наук В. А. ПРОНИН¹, В. А. ЦВЕТКОВ²,
А. В. КОВАНОВ³, Д. В. ЖИГНОВСКАЯ⁴, канд. техн. наук А. П. ВЕРБОЛОЗ⁵

¹maior.pronin@mail.ru, ²wadimtsvetkov@mail.ru, ³Kovanov76@yandex.ru,

⁴diana.zhignovskaya@gmail.com, ⁵apverboloz@itmo.ru

Университет ИТМО

Относительно простая и надежная конструкция, высокая степень автоматизации и использование экономичных способов регулирования производительности минимизируют удельный расход электроэнергии и делают эксплуатацию винтовых компрессоров коммерчески привлекательной. Целью всех систем регулирования производительности винтовых компрессоров является обеспечение оптимальной, с точки зрения минимума потребляемой энергии, работы компрессора при поддержании относительно постоянного конечного давления сжатия независимо от необходимого расхода рабочей среды в сети. В работе рассматривается полная классификация способов регулирования производительности винтовых компрессоров и дается сравнительная оценка возможности их применения для винтового однороторного компрессора (ВКО).

Ключевые слова: винтовой компрессор, производительность компрессора, регулирование производительности, золотник, одновинтовой компрессор.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 09.02.2021, принята к печати 15.04.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Пронин В. А., Цветков В. А., Кованов А. В., Жигновская Д. В., Верболоз А. П. Аналитический обзор способов регулирования производительности винтовых компрессоров // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 28–38. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38

Methods for regulating the performance of screw compressors

D. Sc. V. A. PRONIN¹, V. A. TSVETKOV², A. V. KOVANOV³, D. V. ZHIGNOVSKAIA⁴, Ph. D. A. P. VERBOLOZ⁵

¹maior.pronin@mail.ru, ²wadimtsvetkov@mail.ru, ³Kovanov76@yandex.ru,

⁴diana.zhignovskaya@gmail.com, ⁵apverboloz@itmo.ru

ITMO University

The relatively simple and reliable design, the high degree of automation, and the use of cost-effective performance control methods minimize the specific energy consumption and make the operation of screw compressors commercially attractive. The goal of all screw compressor performance control systems is to ensure optimal, in terms of minimum energy consumption, compressor operation while maintaining a relatively constant final compression pressure, regardless of the required flow rate of the working medium in the network. The paper considers a complete classification of methods for regulating the performance of screw compressors and gives a comparative assessment of the possibility of their application for a screw single-rotor compressor.

Keywords: screw compressor, compressor performance, performance control, slide valve, single-screw compressor.

Article info:

Received 09/02/2021, accepted 15/04/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38

Article in Russian

For citation:

Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Zhignovskaia D. V., Verboloz A. P. Methods for regulating the performance of screw compressors. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 2. p. 28–38. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38

Введение

В настоящее время винтовые компрессоры нашли широкое применение в областях средней производительности, зарекомендовав себя в составе систем тепло- и холодоснабжения промышленных и коммерческих объектов, для охлаждения производственных линий на предприятиях пищевой промышленности, при компримировании горючих газов, для работы пневмоинструмента, а также для технологических нужд химических и нефтеперерабатывающих производств. Благодаря особенностям своей конструкции винтовые компрессоры имеют ряд преимуществ по сравнению с другими компрессорами объемного типа действия. К основным достоинствам винтовых компрессоров можно отнести [1–6]:

- минимальное количество узлов трения;
- динамическую уравновешенность рабочих органов;
- экономию в весе и габаритах;
- высокую эксплуатационную надежность и значительный срок службы;
- стабильность рабочих характеристик.

Отдельно следует выделить возможность плавного регулирования производительности в широком диапазоне [2, 3, 7–9]. Перечисленные положительные качества дают возможность винтовым компрессорам твердо конкурировать на современном рынке компрессорного оборудования с поршневыми и спиральными конструкциями.

Около 70% от общего времени работы компрессора приходится на эксплуатацию при полной нагрузке [10]. Таким образом, энергоэффективность работы винтовых компрессоров напрямую зависит от применяемого метода регулирования производительности. Необходимость в регулировании производительности компрессоров обусловлена рядом факторов, таких как [11–13]:

- непостоянство расхода рабочей среды потребителями пневматической энергии (в составе пневмосетей общепромышленного назначения);
- поддержание необходимой температуры объекта, в котором производится охлаждение, в свою очередь имеющей тенденцию менять свое значение под воздействием теплопритоков (в составе холодильных машин);

— необходимость функционирования оборудования в режимах, отличных от номинального. Например, при поэтапной сдаче строительных объектов, с предусмотренным потреблением холода (применительно к системам холодоснабжения).

В данной статье акцент сделан на винтовой однороторный компрессор, как менее исследованный. История создания первых винтовых однороторных компрессоров относится к 60-м годам прошлого столетия. В 1962 г. был построен прототип конструкции [14] с глобоидным винтом-ротором и двумя отсекателями с прямоугольной формой зуба. Серийно выпускаемые за рубежом однороторные компрессоры, базирующиеся на проекте конструкции, упомянутой в материале [14] и в общем случае конструктивно представляют собой машину, показанную на рис. 1 [15].

Следует отметить, что в настоящее время ведутся достаточно активные исследования в направлении модернизации данной однороторной машины. Ряд инженеров и исследователей предпринимают подходы, направленные на повышение эффективности работы рассматриваемого компрессора. Так, рассматривается возможность изменения формы зуба, реализация надежных CFD-моделей, а также предлагаются оригинальные механизмы регулирования производительности однороторного винтового компрессора в представленном конструктивном исполнении [16–22].

Результатами отечественных исследовательских и опытно-конструкторских работ в области однороторных винтовых компрессоров явилось получение в 2020 г. сотрудниками Университета ИТМО и предприятия АО «Компрессор» патента на полезную модель с окружающей формой зуба отсекаателей [23] (рис. 2), а также изготовление опытных образцов рабочих органов данной машины [24].

В целом, можно констатировать, что ряд проведенных расчетов, а также эксплуатационный опыт показали большую надежность, энергоэффективность, более длительный срок службы и прочие положительные энергетические и эксплуатационные характеристики по сравнению с двухроторными компрессорами. Данное утверж-

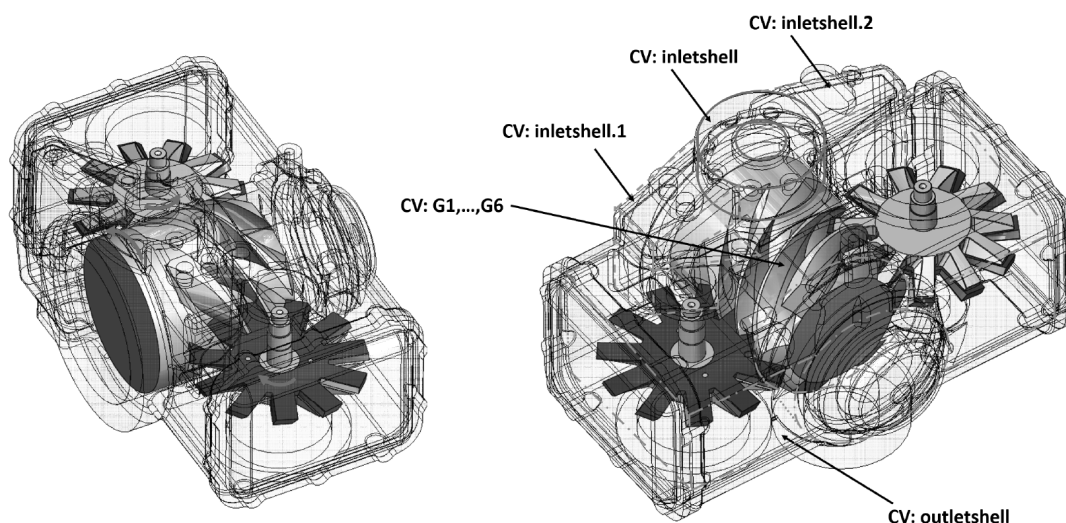


Рис. 1. 3-d изображение конструкции винтового однороторного компрессора

Fig. 1. 3-d representation of screw single-rotor compressor

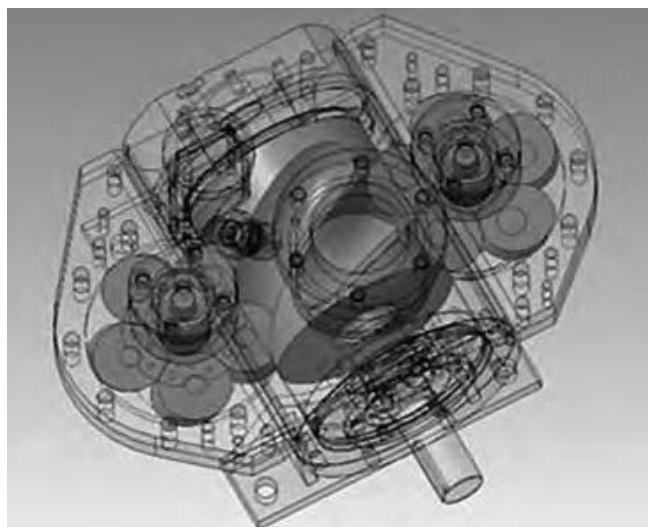


Рис. 2. Винтовой однороторный компрессор с окружным профилем зуба отсекаателя (ВКО)

Fig. 2. Screw single-rotor compressor with circular profile of the clipper tooth

дение обусловлено самой конструкцией однороторного компрессора, которая обеспечивает сбалансированность осевых и радиальных усилий при его работе [2, 9, 25, 26].

Ведущими изготовителями однороторных компрессорных агрегатов являются такие известные компании, как Mitsubishi Electric, Vilter (Emerson) и McQuay (Daikin); двухвинтовые компрессоры изготавливают фирмы Bitzer, Hanbell, Trane, Carrier, York (JCI), Hitachi, Frascold и другие. В Российской Федерации ВКО планируются к изготовлению.

На сегодняшний день рынок винтового компрессорного оборудования по большей части включает в себя двухроторную конструкцию. В аспекте регулирования производительности таких машин накоплен большой эксплуатационный опыт и развитая теоретическая база, чем в однороторных. Поэтому развитие способов регулирования производительности ВКО, ввиду особенностей своей конструкции, представляет особый научно-технический и прикладной интерес. Целью данной работы является обзор и составление полной классификации известных на сегодняшний день способов регулирования производительности винтовых компрессоров, а также оценка возможности их применения в однороторном компрессоре [24].

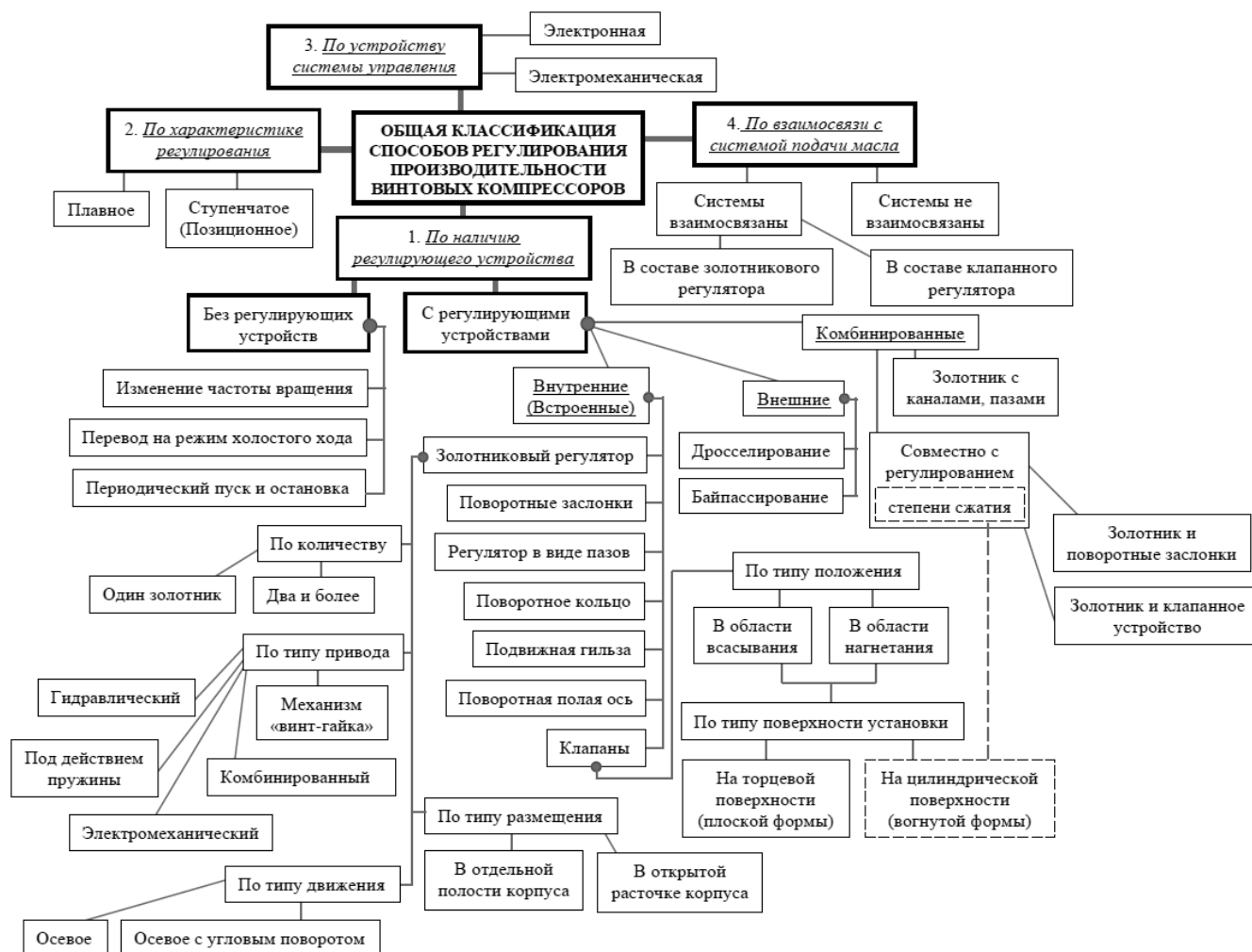


Рис. 3. Классификация способов регулирования винтовых компрессоров

Fig. 3. The methods of regulating the performance of screw compressors

Классификация способов регулирования производительности винтовых компрессоров

Проведенный анализ материалов научной и технической литературы, иллюстрированных изданий производителей винтовых компрессоров, руководств по эксплуатации, а также результаты патентного поиска позволили составить классификацию способов регулирования производительности винтовых компрессоров в виде схемы, приведенной на рис. 3.

Известные способы регулирования производительности винтовых компрессоров условно можно разделить на четыре группы:

1. По наличию регулирующего устройства.
2. По характеристике регулирования.
3. По устройству системы управления.
4. По взаимодействию с системой подачи масла.

Далее в работе выполнен обзор базовых положений о способах регулирования производительности винтовых компрессоров без применения специальных регулирующих устройств, а также с использованием внутренних (встроенных) и внешних регулирующих механизмов.

Наличие в конструкции винтового компрессора специального регулирующего устройства. Существует несколько вариантов регулирования производительности винтовых компрессоров: при помощи специальных устройств (внутренние и внешние), входящих в состав конструкции машины, а также без них.

1. Без специальных регулирующих устройств.

1.1. Изменение частоты вращения [10, 11]. Изменение скорости вращения допустимо при работе многоскоростного двигателя, передачи с регулируемым передаточным отношением или при использовании частотного инвертора. В этом случае имеет место плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне значений. При наличии привода от асинхронного электродвигателя трехфазного тока возможно ступенчатое регулирование.

1.2. Перевод на режим холостого хода [10, 27]. Этот способ является системой периодически непрерывного регулирования, которая работает в соответствии со схемой: если в момент времени дроссельная заслонка (установленная во входном патрубке) на всасывании в компрессор закрыта (что соответствует режиму холостого хода), то через некоторое время давление в сети сжатой рабочей среды упадет до минимально допустимого значения P_{\min} , и регулятор производительности даст импульс на открытие заслонки. Давление в сети начнет возрастать, поскольку производительность компрессора несколько больше потребления сжатой рабочей среды. Через промежуток времени $\Delta t_{\text{наг}}$ наступит момент, когда давление нагнетания достигнет максимально допустимой величины P_{\max} и регулятор производительности даст импульс на закрытие дроссельной заслонки — переход на режим холостого хода, который длится в течение времени $\Delta t_{\text{х.х.}}$, пока вследствие распределения рабочей среды потребителями давление упадет до P_{\min} , и далее эти процессы повторяются. Таким образом, работа винтового компрессора — это чередование процессов нагнетания и холостого хода. Длительность этих процессов (или их частота) зависит от соотношения производительности ком-

прессора и расхода потребителей, а также от характеристик сети (емкость, инерционность).

1.3. Периодический пуск и остановка [27, 28]. Рассматриваемый способ нашел применение у малых компрессоров, с приводом от электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Имеется лимит на количество запусков компрессора — не более 15 раз в час, ввиду данного ограничения компрессорная станция комплектуется большим ресивером. Автоматический регулятор давления останавливает и запускает работу компрессора. В процессе регулирования производительности имеет место быстрое изменение температур отдельных элементов компрессора, которые возникают при периодических пусках и остановках. Данное явление подразумевает наличие увеличенных зазоров между отдельными частями машины, что нежелательно.

2. С регулируемыми устройствами. К данной группе следует отнести внутренние (встроенные), внешние и комбинированные регуляторы производительности.

2.1. Внутренние (встроенные) устройства [2, 7–10, 20, 22, 27–40]. Применение внутренних регулирующих устройств является энергоэффективным методом. Опыт эксплуатации винтовых компрессоров совместно с развитием инженерной мысли в области компрессоростроения обусловили необходимость наличия штатных регуляторов производительности в составе компрессорных машин, а также сформировали большое количество технических решений, рассмотренных в работе далее.

2.1.1. Золотниковый регулятор [10, 28–35]. Данное устройство получило наибольшее распространение среди остальных встроенных регуляторов, отличается от простотой конструкции и возможностью совершенствования. В общем случае, золотник изменяет эффективную длину винтов. Расположен под винтами и перемещается соосно осям винтов. Движение золотника в направлении нагнетательного окна открывает перепускное окно, позволяющее выполнить внутренний перепуск рабочей среды в область всасывания, в результате изменяя производительность винтового компрессора в широком диапазоне значений (10–100%). Авторами работы определено разделение регуляторов производительности золотникового типа на группы по количеству, виду привода, размещению в корпусе машины и виду совершаемого движения.

А) По количеству:

— *Один золотник.* Такая конструкция является типичной для двухроторных винтовых компрессоров. Традиционное исполнение конструктивно включает в себя: сам золотник, неподвижный стопор со стороны всасывания, систему подвода масла и привод [10].

— *Два золотника и более.* Известен патент [28] иллюстрирующий наличие двух индивидуально подвижных золотников в составе системы регулирования производительности. Для регулирования производительности и степени сжатия, в расточке установлена сборка, состоящая из двух золотников взаимно независимого движения. Внешний золотник предназначен для регулирования степени сжатия, в то время как внутренний золотник предназначен для регулирования производительности. Золотники маневрируются с помощью выдвижного

стержня, присоединенного к золотнику, и полого вала, присоединенного к золотнику.

С целью повышения КПД винтового компрессора, было предложено изобретение [29] в котором, в качестве запорного органа для регулирования производительности применяются несколько шарнирно соединенных золотников (в данном случае 3).

Б) По типу привода:

— *Механизм «винт-гайка»*. Авторы патента [30] обращают внимание на существенный недостаток винтовых компрессоров, в которых золотник соединен при помощи штанги с установленным в направляющем цилиндре поршнем, существенно увеличивающем длину компрессора. Решение найдено применением в качестве привода золотника механизма типа «винт-гайка».

— *Гидравлический привод*. Для гидравлического перемещения золотникового регулятора применяется давление масла, подаваемое в гидроцилиндр и перемещающее поршень, с которым золотник имеет жесткую связь [31].

— *Под действием пружины*. Патент [32] описывает следующее устройство регулирования производительности винтового компрессора. Перед запуском компрессора золотник под действием пружины отжимается в сторону всасывающего патрубка до упора в стенку корпуса. В этот момент выпускное окно открывает цилиндрическую поверхность винтовых роторов максимально, в соответствии с минимальным пределом давления внутреннего сжатия, который заложен в конструкцию компрессора. Для изменения режима работы компрессора по давлению, золотниковый регулятор передвигается вдоль роторов под воздействием давления в линии нагнетания, а также усилия пружины и перемещает выпускное окно вдоль роторов до требуемого положения. Такое исполнение компрессора обеспечивает оптимальное изменение степени сжатия в соответствии с изменяющимся конечным давлением, что позволяет исключить непроизводительные затраты энергии, а значит повысить экономичность компрессора на переменных режимах работы.

— *Электрохимический привод*. Известно изобретение [33], в котором изменение положения золотника в винтовом компрессоре производится благодаря устройству, действие которого основано на магнитной индукции. Установка в полости золотника, закрепленного на корпусе стакана из немагнитного диэлектрического материала, и расположение в стакане катушки индуктивности при выполнении золотника из ферромагнитного материала, и при выполнении золотника из немагнитного материала снабжение его втулкой из ферромагнитного материала, расположенной концентрично стакану, и имеющей длину, не превышающую длину катушки индуктивности, позволяет расширить функциональные возможности за счет определения положения золотника.

— *Комбинированный привод*. Также существуют приводы золотниковых регуляторов производительности, включающие в свою конструкцию комбинацию различных механизмов. Так, например, изобретение [34] предусматривает взаимное сочетание классической схемы «поршень-гидроцилиндр» и элемента, совершающего качательное движение.

В) По типу движения.

— *Осевое движение*. В большинстве случаев золотник совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси роторов.

— *Осевое с угловым поворотом*. Известен патент [35], целью которого является упрощение конструкции за счет выполнения золотника в форме цилиндра, который располагается в дополнительной круговой расточке, проделанной параллельно осям роторов в корпусе компрессора. Данная расточка сообщается с расточками корпуса благодаря перпендикулярным сверлениям. Золотниковый регулятор снабжается винтовой кромкой и устанавливается с возможностью совершать угловой поворот вокруг оси.

Г) По типу размещения

— *В открытой расточке корпуса*. Чаще всего золотник помещен в открытую расточку корпуса, которая является нижней частью рабочих расточек под винты роторов компрессора [10]. При данном расположении золотника можно выделить ряд недостатков:

- Воздействие значительных нагрузок от газовых сил.
- Возникновение потребности в приводе золотника большой мощности.
- Ухудшение массогабаритных характеристик компрессора.

· Предусмотренные занижения на поверхностях золотника со стороны рабочих расточек под винты роторов (для обеспечения его движения) вызывают необходимость в повышенных зазорах, являющихся причиной дополнительных утечек рабочей среды с нагнетания компрессора на всасывание, что в определенной мере влечет снижение КПД компрессора.

— *В отдельной полости корпуса*. Материалы источника [35] иллюстрируют винтовую машину, содержащую корпус с рабочей камерой и полостями всасывания и нагнетания, расположенные в рабочей камере и зацепляющиеся ведущий и ведомый роторы. В корпусе также расположен золотник в цилиндрической полости. В составе конструкции имеются заполненные маслом полости, выполненные в два ряда соответственно под ведущим и под ведомым ротором. Эти полости сообщаются с цилиндрической полостью, изолированы от нее и друг от друга в закрытом положении золотника и соединены с рабочей камерой компрессора щелевыми окнами, расположенными под углами к осям роторов, соответствующим углам наклона винтовой линии соответствующих роторов.

2.1.2. *Поворотные заслонки*. Конструкция, разработанная в источнике [36] подразумевает наличие механического привода. При перекрытии окна в начальный период впуска рабочей среды рабочая полость роторов отделяется заслонками от камеры всасывания. При этом давление в ней, с увеличением объема, уменьшается и к моменту соединения рабочей полости с камерой всасывания между ними возникает значительный перепад давлений. Под действием этого перепада рабочая среда поступает в рабочую полость и давление в полости повышается. Связь между всасывающей камерой и рабочей полостью прекращается с использованием заслонок до того момента, как объем рабочей полости достигает максимума. Находящаяся в рабочей камере рабочая сре-

да расширяется до максимального объема. Такой способ регулирования осуществляет уменьшение потребляемой мощности и при полной производительности.

2.1.3. Регулятор в виде пазов. Данный регулятор производительности выполнен из пазов в корпусе компрессора, расположенных под одним или обоими роторами [37, 40]. Клапан постепенно перемещается и открывает определенное количество пазов для перепуска некоторого количества рабочей среды, из парных полостей в которых в это время совершается сжатие, обратно в область всасывания. Конструкция пазов повышает объем парных полостей и создает щели для перетечек рабочей среды между полостями. Характеристики компрессоров с такой системой регулирования производительности при полной нагрузке несколько хуже, чем при регулировании двумя золотниками. Показатели при неполной производительности также ниже по сравнению со схемой с двумя золотниками из-за отсутствия механизма изменения геометрической степени сжатия при неполной производительности. Существенным достоинством конструкции с пазами выступает отсутствие заклинивания системы «регулятор-ротор».

2.1.4. Подвижная гильза. Полезная модель [38] обеспечивает регулирование производительности компрессора, исключая ухудшение его виброакустических и энергетических характеристик. Задача решается за счет того, что конструкция винтового компрессора содержит крышку с пазом нагнетания, корпус с винтовой парой, а также подвижной гильзой, которая продольно перемещается посредством винта. Регулирование производительности производится поворотом гильзы, регулирующей величину окна всасывания.

2.1.5. Поворотная полая ось. Известен патент [39] в конструкции которого винтовая пара установлена на полых осях. Полости осей подключены к источнику охлаждающей жидкости. Одна из осей выполнена с возможностью поворота, в состав которой входит трубчатый теплообменник с образованием вентилируемой камеры. Ротор устанавливается на оси посредством подшипников. Ось и ротор имеют радиальные каналы, обеспечивающие массообмен вентилируемой камеры с камерой нагнетания и рабочим объемом.

2.1.6. Клапаны. Система клапанов предназначена для регулирования производительности и степени сжатия, в зависимости от их расположения в винтовом компрессоре:

- область сжатия (цилиндрическая и торцевая поверхности);
- область нагнетания (цилиндрическая и торцевая поверхности).

Ступенчатое регулирование производительности обеспечивается за счет размещения клапанов в области сжатия, благодаря их открытию производится перепуск рабочей среды обратно на всасывание. При размещении клапанной группы в области окна нагнетания регулируется геометрическая степень сжатия. Клапан, установленный в торцевой части окна нагнетания, имеет плоскую форму, а клапаны в цилиндрической части — вогнутую. При оборудовании машины обоими видами клапанов, при частичной нагрузке обеспечиваются энергетические показатели аналогичные наличию регулятора с двумя золотниками [34, 40].

2.1.7. Поворотное кольцо. В материалах [2] предложен регулятор, представляющий собой конструкцию в виде поворотного кольца. Поворотное кольцо установлено в расточке корпуса в области окон нагнетания винтового однороторного компрессора и устроено таким образом, что при его повороте в корпусе компрессора, открывается перепускное окно, соединяющее полость, образованную впадиной винта и зубом отсекаателя, с областью всасывания. При этом изменяются так же площади окон нагнетания, что позволяет в свою очередь поддерживать заданную геометрическую степень сжатия при изменении его производительности. Внешний привод обеспечивает управление поворотным кольцом, связанным с режимом работы компрессорной машины.

2.2. Внешние устройства [12, 27]. Данная группа регуляторов используется, если система регулирования не требует частого включения или когда другие способы регулирования неприемлемы. Ограничения применения регулирования производительности винтовых компрессоров внешними устройствами обусловлены теми случаями, когда периоды его применения будут не продолжительными, а изменение нагрузки незначительно.

2.2.1. Дросселирование. Для компрессоров холодильной техники, при дросселировании на всасывании между компрессором и испарителем во всасывающий трубопровод устанавливается дроссельный вентиль. Уменьшая проходное сечение дроссельного вентиля, уменьшается давление всасывания в компрессоре. При этом давление в испарителе остается неизменным.

2.2.2. Байпасирование. Байпасированием называется перепуск рабочей среды из нагнетательного трубопровода во всасывающий. При этом способе между нагнетательным и всасывающим трубопроводом компрессора устанавливается запорный (байпасный) вентиль. В момент открытия байпасного вентиля часть сжатой рабочей среды из нагнетательного трубопровода перетекает во всасывающий трубопровод. В компрессоре циркулирует то же самое количество рабочей среды. В промышленных установках байпасирование применяется для разгрузки электродвигателя при пуске компрессора.

Результаты и обсуждение

Рассмотренные способы регулирования производительности винтовых компрессоров так или иначе возможны к применению в конструкции ВКО [23]. Однако следует выделить наиболее подходящие и приемлемые для реализации. Способы регулирования, в ранжированной форме, представлены в табл. 1 с указанием их преимуществ, недостатков и конструктивности применения.

Результаты проведенного обзорного исследования выделяют способы регулирования производительности при помощи золотника и поворотного кольца, как наиболее предпочтительными для применения в ВКО [23] по своим технологическим и конструктивным характеристикам.

Следует отметить, что золотниковый регулятор («салазки») успешно внедрен в однороторную конструкцию с глобидным винтом-ротором [14] и реализуется компанией Vilter в моделях серии VSS и VSM (рис. 4) с применением системы золотников Paralex, которая обеспечивает плавное регулирование производительности в диапазоне от 10 до 100% [9].

Таблица 1

Оценка применения различных типов регулирования производительности в конструкции однороторного винтового компрессора

Table 1

Evaluation of various methods for regulating the performance of screw compressors for a screw single-rotor compressor

Способ регулирования		Преимущества	Недостатки	Конструк- тивность применения для ВКО [23]
Без специальных регуляторов	Изменение частоты вращения	Экономичность с точки зрения энергопотребления	Большие капитальные затраты; Сложность оборудования; Трудозатраты на пусконаладку; При понижении частоты вращения увеличивается количество перетечек и утечек, снижаются объемные и энергетические показатели	
	Перевод на режим холостого хода	Простота системы регулирования	При необходимости, давление в системе не нагнетается, но компрессор продолжает работать, потребляя энергоресурсы; Необходимость в тщательной проработке алгоритмов системы регулирования.	
	Периодический пуск и остановка	Не требует значительных капитальных затрат	Ограничения по частоте пусков и остановок ресурсом компрессорной установки; Резкие температурные скачки отдельных элементов, необходимость в предусмотрении увеличенных зазоров; Потребность в большом ресивере в составе установки	

Альтернативным встроенным регулятором производительности в одновинтовом компрессоре может быть рассмотрено поворотное кольцо. Данный тип удовлетворяет специфике построения рабочих органов ВКО (рис. 5) [23].

Заключение

Важность решения задачи в направлении повышения экономичности регулирования производительности

компрессорного оборудования в составе всех современных инженерных систем является очевидной. Теоретически, все рассмотренные в данной работе способы регулирования производительности (рис. 3, табл. 1) могут быть применены в конструкции ВКО [23]. Проведенный аналитический обзор показал, что среди внутренних регулирующих устройств золотниковый тип и регулятор в виде поворотного кольца могут быть большей мере приняты для реализации. Направление дальнейших исследований базируется на проработке способов регулирования производительности ВКО, проведению физических и постановке численных экспериментов.

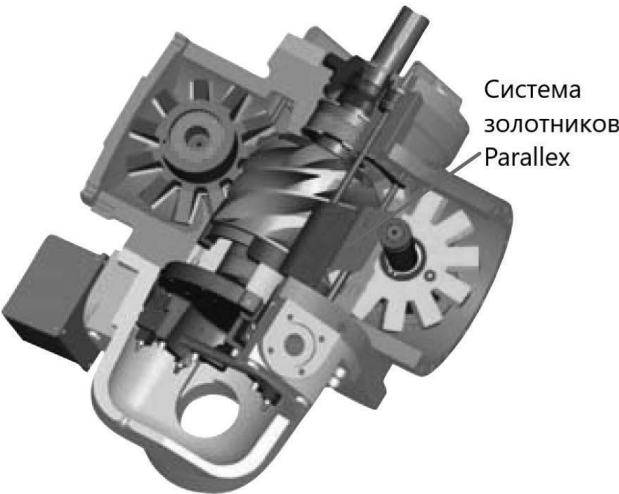


Рис. 4. Одновинтовой компрессор Vilter VSS с системой золотникового регулятора Paralex
Fig. 4. Vilter VSS single-screw compressor with Paralex control slider

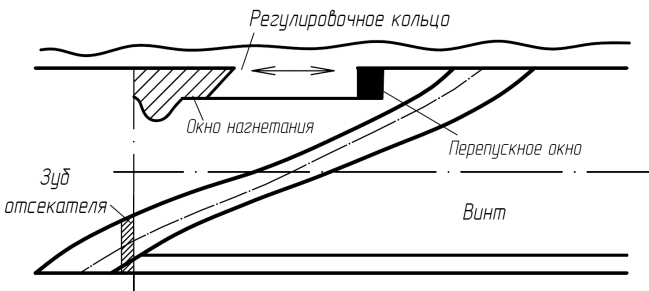


Рис. 5. Система регулирования производительности ВКО посредством поворотного кольца
Fig. 5. The system of regulating the performance of screw single-rotor compressor by slide valve

Продолжение таблицы 1

Способ регулирования		Преимущества	Недостатки	Конструктивность применения для ВКО [23]
Со специальными регуляторами	Внутренние (встроенные)	Золотниковый регулятор	Разнообразие типов золотников, возможность варьировать разным конструкционным исполнением золотника, в зависимости от конфигурации компрессора; Широкий диапазон регулирования (10–100%); Энергоэффективный метод; Положительный эксплуатационный опыт; Простота конструкции	Значительные недостатки отсутствуют
		Поворотные заслонки	Возможность уменьшения потребляемой мощности компрессором при полной производительности	Большое количество механических узлов в механизме движения; Необходимость в дополнительных преобразованиях в корпусе ВКО.
		Регулятор в виде пазов	Исключение вероятности заклинивания регулятора	Более низкие энергетические показатели при неполной производительности из-за отсутствия возможности изменения геометрической степени сжатия
		Подвижная гильза	Положительные энергетические и виброакустические характеристики	Необходимость в дополнительных преобразованиях в корпусе ВКО
		Поворотная полая ось	Возможность охлаждения рабочей среды	Необходимость в дополнительных преобразованиях в корпусе ВКО
		Клапаны	Простота конструкции; Возможность регулирования как производительности, так и степени сжатия.	Относительная надежность конструкции
		Поворотное кольцо	Простота конструкции и привода; Адаптивность к размещению в корпусе ВКО; Поддержание заданной геометрической степени сжатия при изменении производительности	Недостатки отсутствуют
	Внешние	Дросселирование	Не требует значительных капитальных затрат	Термодинамически невыгоден. В составе холодильной машины при уменьшении холодопроизводительности увеличивается потребляемая мощность и резко снижается холодильный коэффициент; Небезопасен, т. к. возможно образование взрывоопасной смеси сжимаемого газа и воздуха при негерметичности машины; Возможность применения только при непродолжительных периодах регулирования
		Байпасирование	Не требует значительных капитальных затрат	Термодинамически невыгоден, т. к. к холодной всасываемой рабочей среде добавляются горячие нагнетательные массы и происходит дополнительный перегрев на всасывании, который влечет увеличение работы цикла, т. е. повышается общая потребляемая мощность

Примечание:

- Способ регулирования является эффективным с точки зрения особенностей рабочих процессов и приемлем для установки (применения) в ВКО с учетом особенностей его конструкции
- Способ регулирования является относительно эффективным, однако вызывает дополнительные сложности для его конструктивного исполнения
- Способ является малоэффективным относительно иных конкурирующих конструктивных вариантов

Литература

References

1. Сакун И. А. Винтовые компрессоры: Основы теории, расчет, конструкция. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1970. 400 с.
2. Пронин В. А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики: дис. ... д. т. н.: 05.04.03. СПб., 1998. 226 с.
3. Пронин В. А. Тенденции развития компрессорной техники // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. №1 (14). С. 9.
4. Stosic N., Smith I., Kovacevic A. Screw compressors: mathematical modelling and performance calculation. Springer Science & Business Media, 2005.
5. Patel H. H., Lakhera V. J. A critical review of the experimental studies related to twin screw compressors // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2020. vol. 234. No 1. p. 157–170.
6. Liu J. et al. A new model of screw compressor for refrigeration system simulation // International journal of refrigeration. 2012. vol. 35. No 4. p. 861–870.
7. Спасский А. А., Спасский И. А., Сушенцева А. В. Винтовые компрессоры Fusheng в России // Холодильная техника. 2017. №. 4. С. 18–23.
8. Гроссе-Крафт Р. Высокоэффективное регулирование производительности компактных винтовых компрессоров «Битцер» серии CSW // Холодильная техника. 2010. №. 10. С. 14–18.
9. Ефимов А. О. Новые модели одновинтовых компрессоров Vilter // Холодильная техника. 2014. №. 1. С. 22–35.
10. Хисамеев И. Г., Максимов В. А. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчет и проектирование. Казань: Фэн, 2000. 638 с.
11. Филиппов И. В. Регулирование производительности винтовых компрессоров // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. № 9. с. 163–180.
12. 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.
13. 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.
14. Zimmern B., Patel G. C. Design and operating characteristics of the Zimmern single screw compressor. 1972.
15. Ziviani D. et al. Non-symmetric approach to single-screw expander and compressor modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017. vol. 232. No 1. p. 012076.
16. Huang R. et al. Characteristics between the meshing pairs with different envelope profile in single screw compressors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017. vol. 232.
17. Ziviani D., Goeghegan P. J., Groll E. A. Performance evaluation of a novel single-screw compressor and expander design // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. vol. 604. No 1. p. 012074.
18. Casari N. et al. CFD Simulations of Single-and Twin-Screw Machines with Open FOAM // Designs. 2020. vol. 4. No 1. p. 2.
19. Liu F. et al. Deformation analysis of the main components in a single screw compressor // Proceedings of the Ninth International
1. Sakun I. A. Screw compressors: Fundamentals of theory, calculation, design. 2nd ed., reprint. and additional. Leningrad: Mashinostroenie, 1970. 400 p. (in Russian)
2. Pronin V. A. Single-rotor screw compressors for refrigeration and pneumatics: dis. D. Sc., St. Petersburg., 1998. 226 p. (in Russian)
3. Pronin V. A. Trends in the development of compressor technology. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. A series of «Refrigeration and air conditioning»*. 2014. No 1 (14). P. 9 (in Russian)
4. Stosic N., Smith I., Kovacevic A. Screw compressors: mathematical modelling and performance calculation. Springer Science & Business Media, 2005.
5. Patel H. H., Lakhera V. J. A critical review of the experimental studies related to twin screw compressors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020. vol. 234. No 1. p. 157–170.
6. Liu J. et al. A new model of screw compressor for refrigeration system simulation. *International journal of refrigeration*. 2012. vol. 35. No 4. p. 861–870.
7. Spassky A. A., Spassky I. A., Sushentseva A. V. Screw compressors of Fusheng in Russia. *Holodil'naya tekhnika*. 2017. No 4. P. 18–23. (in Russian)
8. Grosse-Kracht R. High-efficiency performance control of compact screw compressors «Bitzer» CSW series. *Holodil'naya tekhnika*. 2010. No 10. P. 14–18. (in Russian)
9. Efimov A. O. New models of Vilter single-screw compressors. *Holodil'naya tekhnika*. 2014. No 1. P. 22–35. (in Russian)
10. Khisameev I. G., Maksimov V. A. Two-rotor screw and straight-tooth compressors: theory, calculation and design. Kazan: Fen, 2000. 638 p. (in Russian)
11. Filippov I. V. Performance regulation of screw compressors. *Mechanical engineering and computer technologies*. 2013. No 9. P. 163–180. (in Russian)
12. 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)
13. 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)
14. Zimmern B., Patel G. C. Design and operating characteristics of the Zimmern single screw compressor. 1972.
15. Ziviani D. et al. Non-symmetric approach to single-screw expander and compressor modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. vol. 232. No 1. p. 012076.
16. Huang R. et al. Characteristics between the meshing pairs with different envelope profile in single screw compressors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. vol. 232.
17. Ziviani D., Goeghegan P. J., Groll E. A. Performance evaluation of a novel single-screw compressor and expander design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. vol. 604. No 1. p. 012074.
18. Casari N. et al. CFD Simulations of Single-and Twin-Screw Machines with Open FOAM. *Designs*. 2020. vol. 4. No 1. p. 2.
19. Liu F. et al. Deformation analysis of the main components in a single screw compressor. *Proceedings of the Ninth International*

- Conference on Compressors and Their Systems, London, England. 2015. vol. 90. p. 012011.
20. Wang Z. et al. Research of thermal dynamic characteristics for variable load single screw refrigeration compressor with different capacity control mechanism // *Applied Thermal Engineering*. 2017. vol. 110. p. 1172–1182.
 21. Wang Z. et al. Theoretical and experimental study on thermodynamic performance of single screw refrigeration compressor with Multicolumn Envelope Meshing Pair // *Applied Thermal Engineering*. 2016. vol. 103. p. 139–149.
 22. Wang Z. et al. Research on operating characteristics of single slide valve capacity control mechanism of the single screw refrigeration compressor // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2014. vol. 228. No 8. p. 965–977.
 23. 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., Божedomов А. В., Котлов Н. А.; заявитель и патентообладатель: АО «Компрессор», — заявл. 2020114579; опубли. 07.08.2020, Бюл. № 22.
 24. Пронин В. А., Жигновская Д. В., Божedomов А. В., Семенов А. А., Минакаев А. Ф. Технология изготовления винтового однороторного компрессора на базе 3Dмоделирования // *Холодильная техника*. 2019. №10. С. 36–41.
 25. Бондаренко Г. А. Инженерная теория регулирования винтовых компрессоров переводом на холостой ход // *Вестник Сумского государственного университета. Серия Технические науки*. 2003. №3 (49). С. 63–71.
 26. Lu Y. et al. Performance Improvement of Single Screw Compressor by Meshing Clearance Adjustment Used in Refrigeration System // *Journal of Thermal Science*. 2021. vol. 30. No 1. p. 149–164.
 27. Хлумский В. Ротационные компрессоры и вакуум-насосы / Перевод с чеш. А. А. Трохина; Под ред. И. Ардашева. М.: Машиностроение, 1971. 128 с.
 28. Soderlund F., Karlsson K. Screw compressor having two individually displaceable regulating slides: Patent USA 4597726. 1986.
 29. А. С. 564442 СССР, МПК F 01 C 1/16. Винтовая машина. Диковский Б. М., Нихамкин Э. А., Портянский Ю. С., Ядлин В. Б. 1977, Бюл. №25.
 30. А. С. 332249 СССР, МПК F 04 C 18/16. Винтовой компрессор. Ломакин Ю. Д., Мазитов К. К., Шварц А. И. 1972, Бюл. № 10.
 31. Ейдеюс А. И. Системы и средства автоматизации судовых холодильных установок. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 192 с.
 32. А. С. 792000 СССР, МПК F 04 C 18/14. Винтовой маслозаполненный компрессор. Диментов Ю. И., Подоксик М. Я., Харазов Э. Г., Ежова В. В., Ядлин В. Б. 1980, Бюл. № 48.
 33. А. С. 1262114 СССР, МПК F04C 18/16. Регулятор производительности винтового компрессора. Калупин В. А., Воробьев Ю. М., Канышев Г. А., Пряхин Р. В. 1986, Бюл. № 37.
 34. А. С. 661121 СССР, МПК F 04 C 18/16. Винтовая машина. Ядлин В. Б., Портянский Ю. С., Нихамкин Э. А., Подоксик М. Я., Диковский Б. М. 1979, Бюл. № 17.
 35. Патент 910133 СССР, МПК F 04 C 18/16. Винтовой компрессор. Шиббай Х., Энглунд А. 1982, Бюл. № 8.
 36. А. С. 498413 СССР, МПК F 04 C 18/16. Устройство для регулирования винтового компрессора / Андреев П. А., Афонин В. В., Бобриков Н. И., Захарова Л. Ф., Сидора Н. Н., Тарасов А. М. 1976, Бюл. №1.
 - Conference on Compressors and Their Systems, London, England. 2015 vol. 90. p. 012011.
 20. Wang Z. et al. Research of thermal dynamic characteristics for variable load single screw refrigeration compressor with different capacity control mechanism. *Applied Thermal Engineering*. 2017. vol. 110. p. 1172–1182.
 21. Wang Z. et al. Theoretical and experimental study on thermodynamic performance of single screw refrigeration compressor with Multicolumn Envelope Meshing Pair. *Applied Thermal Engineering*. 2016. vol. 103. p. 139–149.
 22. Wang Z. et al. Research on operating characteristics of single slide valve capacity control mechanism of the single screw refrigeration compressor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2014. vol. 228. No 8. p. 965–977.
 23. Screw single-rotor oil-filled compressor: Patent of the Russian Federation 199030: IPK7 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: JSC «Compressor», — application 2020114579; Publ. 07.08.2020, Byul. No. 22. (in Russian)
 24. Pronin V. A., Zhignovskaya D. V., Bozhedomov A. V., Semenov A. A., Minikaev A. F., Manufacturing technology of a screw single-rotor compressor based on 3dmodeling. *Holodil'naya tekhnika*. 2019. No 10. P. 36–41. (in Russian)
 25. Bondarenko G. A. Engineering theory of regulation of screw compressors by idling transfer. *Bulletin of Sumy State University. Technical Sciences series*. 2003. No 3 (49). P. 63–71. (in Russian)
 26. Lu Y. et al. Performance Improvement of Single Screw Compressor by Meshing Clearance Adjustment Used in Refrigeration System. *Journal of Thermal Science*. 2021. vol. 30. No 1. p. 149–164.
 27. Khlumsky V. Rotary compressors and vacuum pumps / Translated from Czech by A. A. Trokhin; Edited by V. I. Ardashev. Moscow: Mashinostroenie, 1971. 128 p. (in Russian)
 28. Soderlund F., Karlsson K. Screw compressor having two individually displaceable regulating slides: Patent USA 4597726. 1986.
 29. Copyright certificate 564442 USSR, MPK F 01 C 1/16. Screw machine. Dikovskij B. M., Nihamkin E. A., Portyanskij Yu. S., Yadlin V. B. 1977, Byul. No 25. (in Russian)
 30. Copyright certificate 332249 USSR, MPK F 04 C 18/16. Screw compressor. Lomakin Yu. D., Mazitov K. K., Shvarc A. I. 1972, Byul. No 10. (in Russian)
 31. Eideyus A. I. Systems and means of automation of ship refrigeration installations. Moscow: Light and food industry, 1983. 192 p. (in Russian)
 32. Copyright certificate 792000 USSR, MPK F 04 C 18/14. Screw oil-filled compressor. Dimentov Yu. I., Podoksik M. Ya., Harazov E. G., Ezhova V. V., Yadlin V. B. 1980, Byul. No 48. (in Russian)
 33. Copyright certificate 1262114 USSR, MPK F04C 18/16. Screw compressor performance controller. Kalupin V. A., Vorob'ev Yu. M., Kanyshv G. A., Pryahin R. V. 1986, Byul. No 37. (in Russian)
 34. Copyright certificate 661121 USSR, MPK F 04 C 18/16. Screw machine. Yadlin V. B., Portyanskij Yu. S., Nihamkin E. A., Podoksik M. Ya., Dikovskij B. M. 1979, Byul. No 17. (in Russian)
 35. Patent 910133 USSR, MPK F 04 C 18/16. Screw compressor. Shibbaj H., Englund A. 1982, Byul. No 8. (in Russian)
 36. Copyright certificate 498413 USSR, MPK F 04 C 18/16. Device for regulating the screw compressor. Andreev P. A., Afonin V. V., Bobrikov N. I., Zaharova L. F., Sidora N. N., Tarasov A. M. 1976, Byul. No 1. (in Russian)

37. Зимков А. А. Повышение эффективности регулирования производительности и геометрической степени сжатия холодильных винтовых компрессоров с помощью внутренних устройств: автореферат дис. ... к. т. н.: 05.04.03. СПб., 2014. 129 с.
38. Винтовой компрессор: Патент РФ 89638: МПК7 F 04 C 18/16. Шахматов Е. В., Крючков А. Н., Белов Г. О.; заявитель и патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева; заявл. 2009116680; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 22.
39. А. С. 994801 СССР, МПК F 04 C 18/16. Винтовой компрессор. Юша В. Л., Кабаков А. Н., Болштынский А. П. 1983, Бюл. № 5.
40. Field M. G., Shaw D. N. Capacity volume ratio control for twin screw compressors: Patent USA 5044894. 1991.
37. Simkov A. A. Improve control performance and geometrical compression refrigeration screw compressors with internal devices: thesis PhD, St. Petersburg., 2014. 129 p. (in Russian)
38. Screw compressor: Patent RF 89638: MPK7 F 04 C 18/16 / Shahmatov E. V., Kryuchkov A. N., Belov G. O. Applicant and the patent holder: Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev; application 2009116680; publ. 12.10.2009, Byul. no. 22. (in Russian)
39. Copyright certificate 994801 USSR, MPK F 04 C 18/16. Screw compressor. Yusha V. L., Kabakov A. N., Bolshtyanskiy A. P. 1983, Byul. No 5. (in Russian)
40. Field M. G., Shaw D. N. Capacity volume ratio control for twin screw compressors: Patent USA. 5044894. 1991.

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

Цветков Вадим Александрович

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

Кованов Александр Викторович

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

Жигновская Диана Валерьевна

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

Верболоз Александр Павлович

К. т. н., тьютор факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, apverboloz@itmo.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

Tsvetkov Vadim A.

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

Zhignovskaia Diana V.

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

Verboloz Aleksandr P.

PhD, Tutor of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, apverboloz@itmo.ru



XII Международная специализированная выставка

5 – 8 октября 2021 г.

Уникальный отраслевой проект, способствующий комплексному решению проблем энергетики в промышленности и ЖКХ, инфраструктурного развития территорий, энерго- и экологической безопасности.

Место проведения:

Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1, КВЦ "Экспофорум"
Бесплатный трансферный автобус от станции метро "Московская"

Организатор выставки:

ООО "ФАРЭКСПО"

<https://energysaving-expo.ru/>