

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF322772>

Уточненный расчет процесса сжатия в спиральном компрессоре

А.А. Жаров, А.В. Борисенко, А.В. Валякина, В. С. Быковская

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (научно исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование: В виду того, что геометрическая степень сжатия спиральных компрессоров остается постоянной, а фактическая (от давления всасывания до давления нагнетания) – варьируется в зависимости от эксплуатационных условий, для корректности динамического расчета компрессора необходимо предусматривать дополнительное сжатие, происходящее в первой (центральной) полости спиралей до давления нагнетания. При определении давлений в разных полостях в спиральном блоке при вращении вала необходимо так же учитывать скачок, возникающий непосредственно после объединения первой и второй полостей между спиральями. Одновременно с этим при проектировании геометрии спиралей необходимо учитывать подрезание конца спиралей для обеспечения требуемой геометрической степени сжатия.

Цель работы – создание уточненной методики динамического расчета спирального компрессора, учитывающей постоянство геометрической степени сжатия и скачки давления при объединении первой и второй полостей (центральной и примыкающей) между спиральями.

Методы: Представлена пошаговая методика динамического расчета спирального компрессора. Изложены принципы моделирования процесса сжатия в спиральном компрессоре в среде математического моделирования Mathcad. Рассмотрен случай различных геометрической и фактической степеней сжатия компрессора. Изложен принцип построения индикаторной диаграммы компрессора. Предложены методы определения сил и моментов, возникающих в процессе работы компрессора, и приведены их графики. На практическом примере моделирования показано преимущество предлагаемой методики.

Результаты: Получены зависимости, позволяющие оценить изменение объемов и давлений в полостях сжатия компрессора в зависимости от угла подрезки спиралей. Получены зависимости изменения сил и моментов, возникающих при работе компрессора, учитывающие скачок давления, вызванный объединением полостей. Оценка точности моделирования полостей сжатия спирального компрессора и процессов, проходящих в них, производилась путем нахождения относительной погрешности эффективной мощности компрессора, полученной в результате теплового расчета и мощности, полученной в результате динамического расчета. Погрешность мощности в приведенном расчете составила 8,8%, что свидетельствует о высокой точности предлагаемой методики.

Заключение: Разработана уточненная методика динамического расчета спирального компрессора в среде математического моделирования Mathcad, позволяющая рассчитать давления в парных полостях спирального блока, а так же все необходимые силы и моменты, возникающие в процессе вращения вала компрессора с учетом подрезки спирали для получения заданной геометрической степени сжатия и с учетом скачка давления при объединении первой и второй полостей между спиральями.

Ключевые слова: спиральный компрессор; динамический расчет спирального компрессора; полости сжатия; осевые силы; газовые силы; проектирование спиралей компрессора; геометрическая степень сжатия.

Как цитировать:

Жаров А.А., Борисенко А.В., Валякина А.В., Быковская В.С. Уточненный расчет процесса сжатия в спиральном компрессоре // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 2. С. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF322772>

DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf322772>

Verified calculation of compression process in a scroll compressor

Anton A. Zharov, Artem V. Borisenko, Anna V. Valiakina, Veronika S. Bykovskaya

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Because the geometric compression ratio of scroll compressors remains constant and the actual compression ratio (from suction to discharge pressure) varies depending on the operating conditions, allowing additional compression to occur in the first (central) cavity of scrolls up to the discharge pressure is necessary for correctness of the dynamic calculation of compressors. When the pressure in the different cavities in a scroll block during shaft rotation is determined, we need to take into account the surge that occurs immediately after the union of the first and second cavities between the scrolls. Simultaneously, during the design of the geometry of spirals, undercutting the end of the spirals must be considered to ensure the required geometric compression ratio.

AIM: The aim of this study is to create a refined methodology for the dynamic calculation of a scroll compressor, which takes into account the constancy of geometric compression ratio and pressure jumps when the first and second cavities (central and adjoining cavities) between the scrolls are combined.

METHODS: A step-by-step methodology for the dynamic calculation of a scroll compressor is presented. The principles of modeling the compression process in the scroll compressor in a Mathcad modeling environment are outlined. The case of different geometric and actual degrees of compression of the compressor is considered. The construction principle of the compressor indicator diagram is presented. Methods of determining the forces and moments that arise in the compressor-operation process are presented, and their graphs are shown. A practical example of modeling the advantage of the proposed methodology is shown.

RESULTS: Dependence that allows estimation of the change in the volumes and pressure in the compressor compression cavities according to the angle of scroll trimming is obtained. The dependence of the change in the forces and moments that arise during compressor operation, which takes into account the pressure jump caused by cavity unification, is obtained. The modeling accuracy of the scroll-compressor compression cavities and the processes that take place in these cavities are assessed by determining the relative error of the effective compressor power resulting from the thermal calculation and the power resulting from the dynamic calculation. The power error in the aforementioned calculations amounts to 8.8%, which indicates the high accuracy of the proposed methodology.

CONCLUSION: A refined method of dynamic calculation of a scroll compressor in a Mathcad modeling environment has been developed. This method allows calculation of the pressure in paired cavities of a scroll block, including all the necessary forces and moments that arise during the rotation process of the compressor shaft. This method also takes into account scroll trimming to obtain the given geometric degree of compression and the pressure jump when the first and second cavities between the scrolls are combined.

Keywords: scroll compressor; dynamic calculation of scroll compressor; compression cavities; axial forces; gas forces; design of compressor scrolls; geometric compression ratio.

To cite this article:

Zharov AA, Borisenko AV, Valiakina AV, Bykovskaya VS. Verified calculation of compression process in a scroll compressor. *Refrigeration Technology*. 2021;110(2): 85–94. DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf322772>

Received: 09.04.2023

Accepted: 29.06.2023

Published online: 08.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спиральные компрессоры широко используются для систем кондиционирования, а также в тепловых насосах, о чем свидетельствуют многочисленные патенты и исследования [1–11]. Это обусловлено, в частности, таким преимуществами данного вида машин, как, например, низкий уровень шума, возникающий при работе компрессора [12], высокая энергетическая эффективность, которая наряду с эффективностью теплообменников холодильных машин [13] играет важную роль в энергетической эффективности всей холодильной машины [14, 15]. Важно отметить, что спиральные машины могут быть также использованы и в детандерном режиме [16].

Одним из начальных этапов проектирования спирального компрессора является проведение теплового и динамического расчетов. Результатом теплового расчета служит определение мощности компрессора, а результатом динамического расчета – определение сил и моментов, действующих на вал компрессора в процессе сжатия. Основой грамотного динамического расчета является создание наиболее точной математической модели геометрии полостей сжатия компрессора и процессов, протекающих в них. Как правило, такие расчеты проводятся в специальных математических программах, позволяющих моделировать сложные зависимости процессов, происходящих в полостях сжатия, включая и нестационарные тепловые потери в процессе сжатия [17].

На сегодняшний день существуют различные методики определения геометрии спиралей [18], процесса сжатия [19–20], сил и моментов [21], возникающих в процессе работы компрессора. Однако, многие из них являются довольно трудоемкими и требуют специального программного обеспечения для проведения аналогичных расчетов самостоятельно. Общей тенденцией таких расчетов является упрощение сложных процессов, происходящих в результате работы компрессора [22–23].

За 35 лет с момента создания первого промышленного образца спирального компрессора японской фирмой Hitachi Ltd [24] многие проблемы, связанные с проектированием спиральной части компрессора, так и не были решены. В частности, проблема определения оптимального угла подрезки спиралей у основания по-прежнему является актуальной, о чем свидетельствуют работы [25]. Так же не теряет значимости проблема определения зависимости изменения давления в полостях сжатия.

Разработанная настоящим авторским коллективом методика использовалась при динамическом расчете цифрового спирального компрессора для теплового насоса холодопроизводительностью 14 кВт, работающего в режиме обогрева. Погрешность расчета оценивалась на основе теплового расчета, проведенного в соответствии с работой [26]. Полученные результаты сравнивались с аналогичными для СПК Copeland ZFD41K5E – TFD.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование процесса сжатия в спиральном компрессоре происходило в несколько этапов. На первом этапе определялась фактическая степень сжатия в компрессоре и выбиралась геометрическая степень сжатия. В данной работе был смоделирован компрессор для теплового насоса, поэтому геометрическая степень сжатия была принята равной 2,5, так как это стандартная геометрическая степень сжатия для компрессоров такого типа. На втором этапе выполнялся предварительный расчет геометрических размеров спиральных элементов. Данный этап не учитывал профилирование начального участка спирали и нагнетательного окна. Профилем ребра спирали была выбрана спираль Архимеда. Исходя из рекомендаций [24], были выбраны относительная высота ребра спирали, относительный эксцентриситет и относительный диаметр нагнетательного отверстия. Затем, с учетом принятых величин, были рассчитаны толщина ребра спирали δ , величина эксцентриситета e , диаметр нагнетательного отверстия d_n , радиус начальной окружности спирали r_0 , шаг спирали t и высота ребра спиралей h . На третьем этапе моделировался профиль ребра спиралей и их взаимное расположение в процессе вращения вала. На четвертом этапе моделировались нагнетательные полости, образованные спиралью, и их параметры. На пятом этапе моделировалось изменение давления, происходящее в полостях сжатия, была построена индикаторная диаграмма компрессора. На шестом этапе были рассчитаны силы и моменты, возникающие в процессе сжатия. В заключении оценивалась погрешность предлагаемой динамической модели.

ГЕОМЕТРИЯ СПИРАЛЕЙ

Проекция поверхностей спиралей компрессора на горизонтальную плоскость представляют собой спирали Архимеда.

Внешняя поверхность неподвижной спирали задается в декартовой прямоугольной системе координат системой уравнений [25]:

$$\begin{cases} x_1(\varphi) = r_0 \varphi \cos(\varphi) \\ y_1(\varphi) = r_0 \varphi \sin(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

где φ — угол закрутки спирали, рад.

Уравнение, описывающее внутреннюю поверхность неподвижной спирали, учитывает «сжатие» спирали на толщину ребра δ относительно внешней поверхности.

Внешняя поверхность подвижной спирали задавалась путем добавления величины, учитывающей положение эксцентриситета подвижной спирали относительно центра неподвижной в зависимости от угла поворота вала. Так как подвижная спираль развернута на 180°

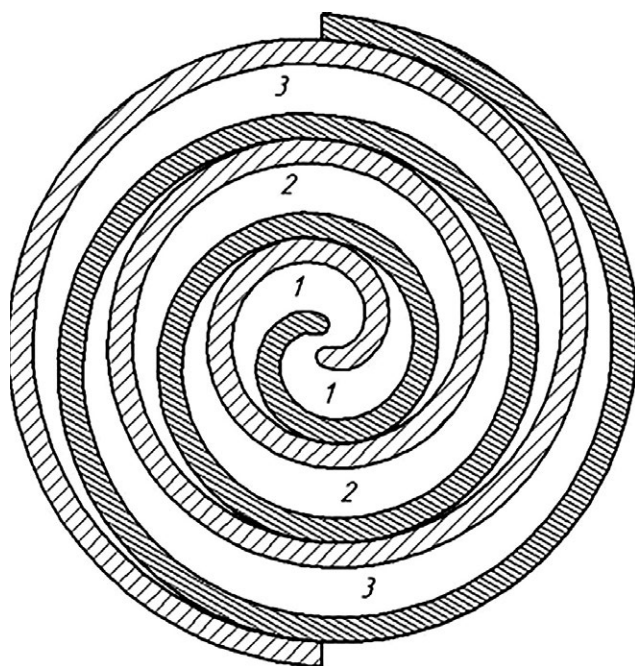


Рис. 1. Нумерация полостей сжатия.

Fig. 1. Compression chambers numbering.

относительно неподвижной, к углу закрутки была прибавлена величина π .

Внутренняя поверхность подвижной спирали моделировалась с учетом «сжатия» внешней поверхности подвижной спирали на величину δ .

Далее для удобства работы с тригонометрическими зависимостями был выполнен переход в полярную систему координат.

Затем, необходимо определить начальный и конечный углы закрутки спиралей. Угол подрезки спиралей φ_n был определен исходя из трех условий. Первым условием

являлась взаимная «проворачиваемость» спиралей друг относительно друга. Это условие было достигнуто путем варьирования угла поворота вала от 0 до 2π и определения минимального радиуса спирали, при котором достигается возможность взаимного передвижения. Вторым условием являлась невозможность перекрытия неподвижной спиралью окна нагнетательного отверстия. Так как нагнетательное отверстие может быть распложено не строго по центру неподвижной спирали, а также может иметь форму отличную от цилиндрической, данное условие было проверено путем геометрического построения. Третье условие заключалось в соответствии геометрической степени сжатия компрессора заданной. Конечный угол закрутки φ_k был определен из условия равенства диаметров спирали. Первый диаметр был получен в результате теплового расчета как деление объема парных ячеек при условии на всасывании W_n , на объем этих ячеек, обусловленный моделированием геометрии спиралей компрессора. Второй диаметр представляет собой сумму двух радиус-векторов внешней поверхности неподвижной спирали с разницей угла закрутки π :

$$\begin{cases} d_{\max} = \frac{W_i}{2\pi h e} + 4\delta + e; \\ d_{\max} = r_1(\varphi_k) + r_1(\varphi_k - \pi). \end{cases} \quad (2)$$

ПОЛОСТИ СЖАТИЯ

Полости сжатия спирального компрессора являются парными и нумеруются от центра к периферии, полости сжатия представлены на рис. 1. Исходя из геометрии спиралей, объемы полостей в каждой паре равны. Так как спирали подрезаны на угле φ_n , то при определенном угле поворота вала z_1 будет происходить объединение второй и первой полостей. Поэтому была введена

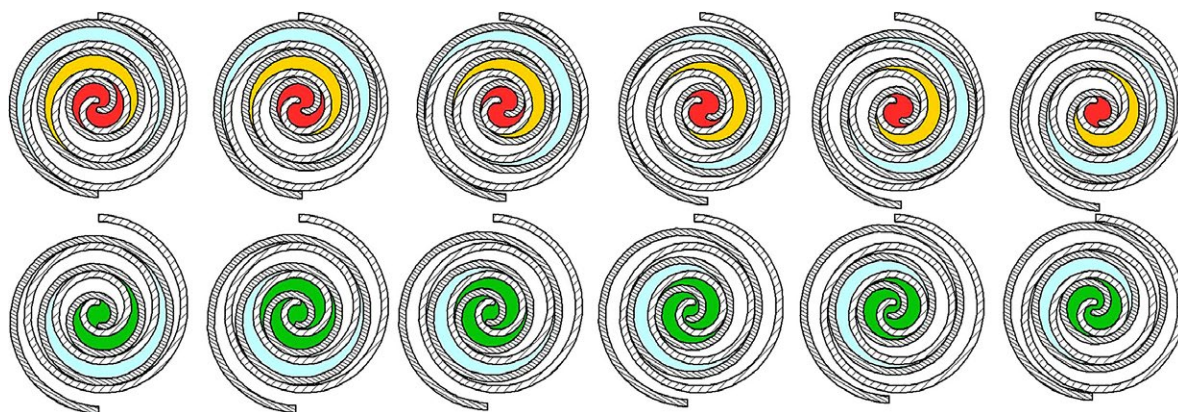


Рис. 2. Изменение положения полостей сжатия за один оборот вала с шагом 30° ($\pi/6$).

Fig. 2. Changing the position of compression chambers in one shaft rotation at 30° ($\pi/6$) intervals.

дополнительная полость 0, являющаяся суммой первых двух парных полостей. Данная полость существует только от угла поворота вала z_1 до 2π , затем полости разъединяются и существуют отдельно.

Для определения функций, описывающих изменение объемов парных полостей, необходимо было задать функции изменения углов касания спиралей. Эти углы показывают, где начинается и заканчивается парная полость. Углы касания отстоят друг от друга на 2π . В ходе расчета было принято, что процесс сжатия начинается с закрытия третьей парной полости, следовательно, последним углом касания является φ_k .

Объем парной полости представляет собой произведение высоты ребра спирали h на площадь полости. Изменяющаяся площадь серповидной парной полости была представлена в виде интеграла от квадратов разности радиус-векторов внутренней поверхности неподвижной спирали и внешней поверхности подвижной спирали. Таким образом, зависимость объема третьих парных полостей принимает следующий вид:

$$V_3(z) = h_{CK} \int_{\varphi_k - 2\pi - z}^{\varphi_k - z} \left(r_{11}(\varphi)^2 - r_{22}(\varphi - \pi, \varphi_k - z)^2 \right) d\varphi. \quad (3)$$

Интеграл в (3) учитывает объем двух парных полостей, так как угол интегрирования φ изменяется на 2π .

Объем первой полости определяется зависимостью:

$$V_1(z) = h_{CK} \cdot \left(\int_{\varphi_{cn}}^{\varphi_k - z - 4\pi} \left(r_{11}(\varphi)^2 - r_{22}(\varphi - \pi, \varphi_k - z)^2 \right) d\varphi + \int_{\varphi_n}^{\varphi_{cn}} \left(r_{11}(\varphi)^2 \right) d\varphi \right) + V_{HK}. \quad (4)$$

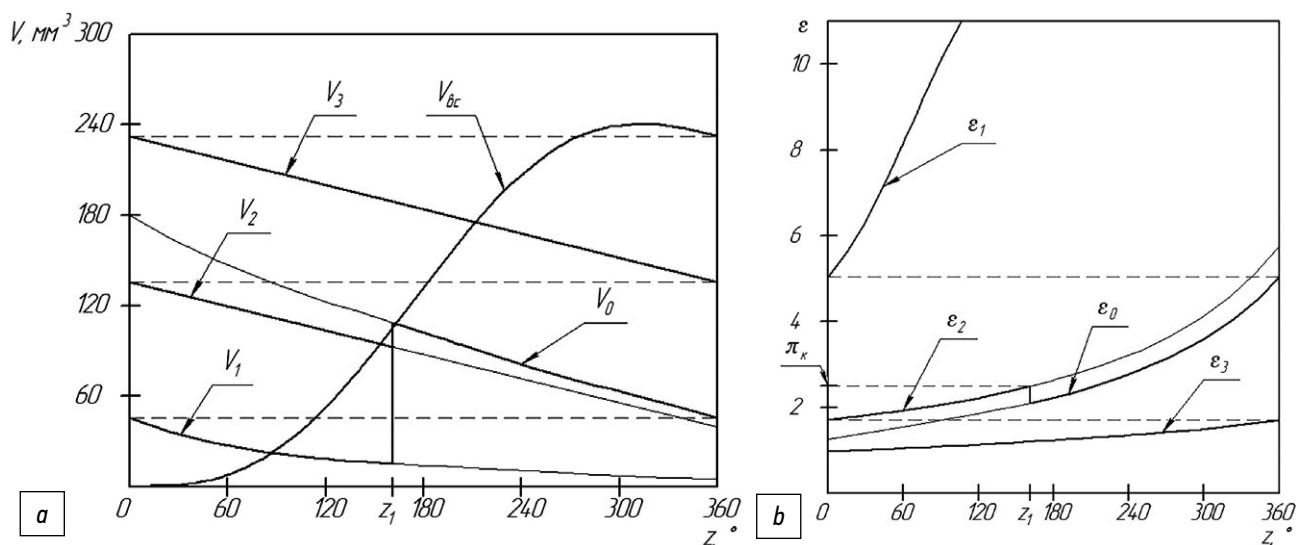


Рис. 3. Графики изменения объемов (а) и степеней сжатия (б) парных полостей.

Fig. 3. Diagrams of changes in volumes (a) and compression ratios (b) of paired chambers.

Каждая полость характеризуется степенью сжатия, являющейся отношением объема полости к начальному объему всасываемого газа. Начальный объем газа был найден из зависимости (3) при угле поворота вала $z=0$. Графики изменения объемов (а) и степени сжатия в парных полостях (b) в зависимости от угла поворота вала представлены на рис. 3.

ДАВЛЕНИЕ

Процесс сжатия в спиральном компрессоре был принят политропным с показателем политропы n . Поэтому изменение давления в процессе сжатия в каждой полости описывается зависимостью:

$$p(z) = p_{sc} \varepsilon(z)^n. \quad (5)$$

Такой зависимости нельзя придерживаться при описании давления, получаемого при объединении второй и первой полостей. Так как при объединении полостей смешиваются давление, достигнутое во второй полости до объединения, и давление первой полости, равное давлению нагнетания, необходимо было определить установившееся давление в полости 0 сразу после ее образования. Установившееся давление было определено исходя из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$p_{\Sigma} = \frac{m_{\Sigma}}{V_{\Sigma}} RT_{\Sigma}. \quad (6)$$

При расчете давления было принято, что:

1. температура изменяется по закону политропного процесса;
2. масса газа в третьей и второй полостях одинаковы и равны произведению начального объема третьей полости на плотность газа при условии на всасывании;

3. энергия газа после объединения полостей равна сумме энергий газа во второй и первой полостях до объединения;
4. изобарная теплоемкость газа не меняется в процессе сжатия.

Таким образом, изменение давления в парных полостях было рассчитано следующим образом: давление в третьей полости меняется в соответствии с формулой (5), давление во второй полости до угла z_1 изменяется аналогично, при образовании полости 0, давление в ней меняется скачкообразно на давление, рассчитанное в соответствии с формулой (6), затем сжатие продолжается по политропному закону (5). При повороте вала на 360 градусов происходит разъединение полостей, причем начальный объем первой полости равен конечному объему полости 0. В первой полости происходит дожатие газа до давления нагнетания по политропному закону, затем открывается нагнетательное отверстие и происходит выпуск газа. График изменения давления в полостях сжатия компрессора в зависимости от угла поворота вала (а) и индикаторная диаграмма (b) представлены на рис. 4.

СИЛЫ И МОМЕНТЫ

Осевые Силы

Осевые силы возникают в полостях сжатия компрессора и действуют вдоль оси вала. Эти силы были найдены как силы давления, действующие на плоскую стенку, т.е. как произведение площади полости на разность давлений с двух сторон основания спирали. Причем, при расчете было учтено, что до угла z_1 силы возникают в первой, второй и третьей парных полостях, а после – силы возникают в нулевой и третьей полостях. Расчет этих сил необходим для определения силы, которую нужно приложить для поджатия подвижной спирали к неподвижной.

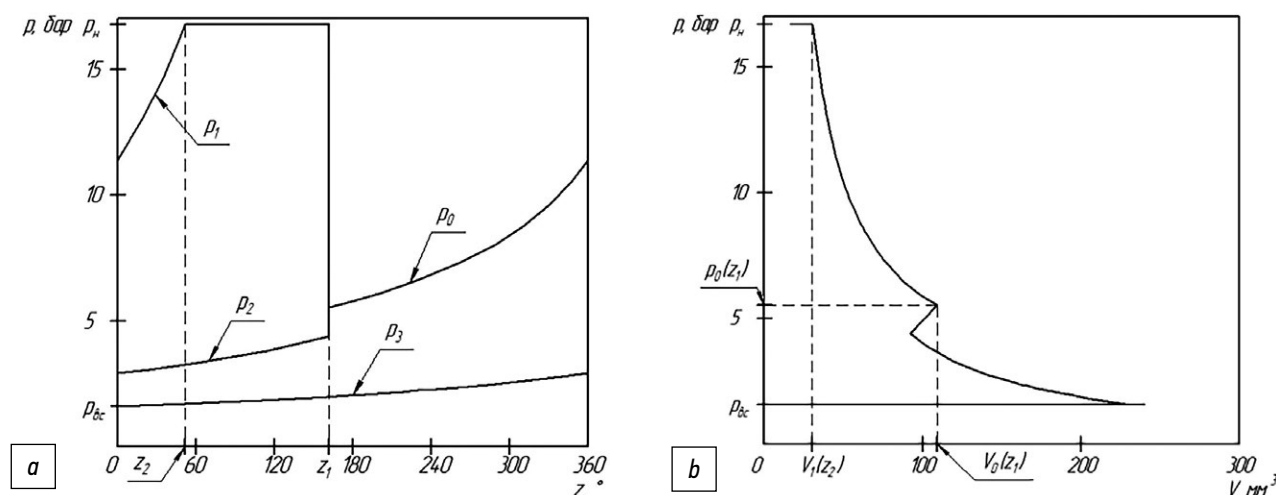


Рис. 4. Изменение давлений в парных полостях (а) и индикаторная диаграмма компрессора (b).

Fig. 4. Change in pressure in paired chambers (a) and compressor indicator diagram (b).

Газовые Силы

Газовые силы действуют в радиальном направлении. Они были рассчитаны по методике, изложенной в [21]. Данные силы вызывают неуравновешенность компрессора, их расчет необходим для определения противовесов, уравнивающих компрессор.

МОМЕНТЫ

Момент от газовых сил относительно оси вала был найден путем умножения суммарной газовой силы на эксцентриситет. Для получения суммарного момента, возникающего на валу, к моменту газовых сил был прибавлен момент трения, найденный как результат умножения коэффициента трения на газовую силу. Графики осевых сил (a) суммарной газовой силы (b) и суммарного момента на валу (c) в зависимости от угла поворота вала представлены на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка точности моделирования полостей сжатия спирального компрессора и процессов, проходящих

в них, оценивалась путем нахождения относительной погрешности эффективной мощности компрессора, полученной в результате теплового расчета и мощности, полученной в результате динамического расчета. Погрешность мощности в приведенном расчете составила 8,8%, что свидетельствует о высокой точности предлагаемой методики.

ВЫВОДЫ

Разработана методика динамического расчета спирального компрессора в среде математического моделирования Mathcad, позволяющая оценить геометрию спиралей, а также силы и моменты, возникающие в процессе вращения вала с точностью до 8,8%.

Получены зависимости, позволяющие оценить изменение объемов и давлений в полостях сжатия компрессора в зависимости от угла подрезки спиралей.

Получены зависимости изменения сил и моментов, возникающих при работе компрессора, учитывающие скачок давления, обусловленный объединением полостей.

Достоинствами предлагаемой методики являются: довольно высокая точность, получаемых результатов,

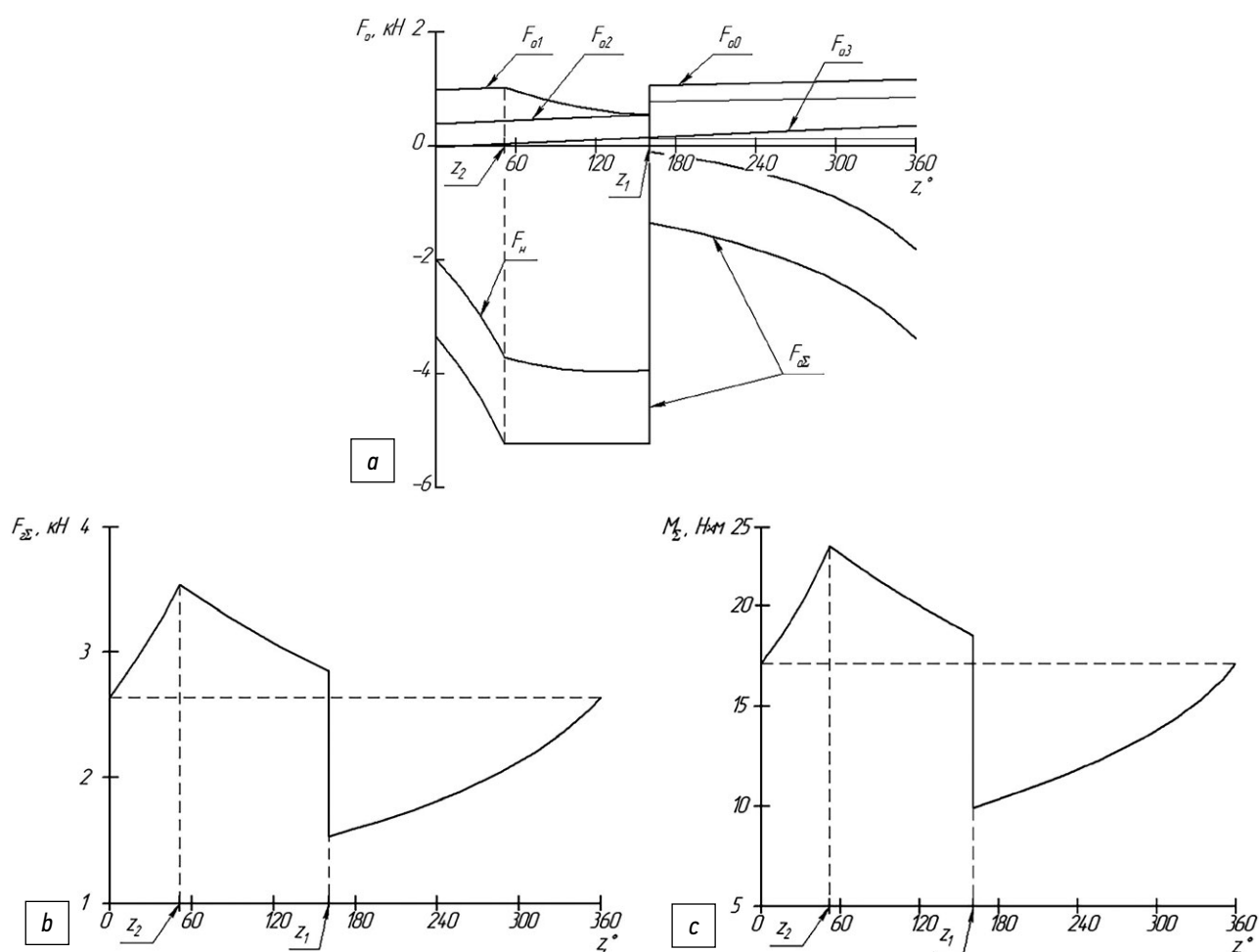


Рис. 5. Осевые силы (a), суммарная газовая сила (b), суммарный момент на валу (c).

Fig. 5. Axial Forces (a), total gas force (b), total shaft torque (c).

а также простота применения для проведения самостоятельных аналогичных расчетов.

К недостаткам можно отнести наличие упрощений и допущений, принятых в расчете, например, не учитываются перетечки газа между спиралями, при расчете давлений газ считается идеальным и т.д.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patent USA N 10/184,472 2019 / 22.01.2019. Ryu B., Ko Y., Kim B., et al. Scroll compressor and air conditioner including a scroll compressor. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US10184472B2/en?q=Ryu%2c+B.%2c+Ko%2c+Y.%2c+Kim%2c+B.%2c+Kim%2c+B.%2c+%26+Chung%2c+B.+\(2019\).+U.S.+Patent+Application+No.+10%2f184%2c472](https://patents.google.com/patent/US10184472B2/en?q=Ryu%2c+B.%2c+Ko%2c+Y.%2c+Kim%2c+B.%2c+Kim%2c+B.%2c+%26+Chung%2c+B.+(2019).+U.S.+Patent+Application+No.+10%2f184%2c472)
2. Patent USA N 10/590,931 2020 / 17.03.2020. Park H., Kang S., Lee K., et al. Scroll compressor and air conditioner having the same. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US10590931B2/en?q=Hansaem%2c+P.+A.+R.+K.%2c+Soojin%2c+K.+A.+N.+G.%2c+Lee%2c+K.%2c+JEONG%2c+H.%2c+%26+Kim%2c+C.+\(2018\).+U.S.+Patent+Application+No.+16%2f016%2c303](https://patents.google.com/patent/US10590931B2/en?q=Hansaem%2c+P.+A.+R.+K.%2c+Soojin%2c+K.+A.+N.+G.%2c+Lee%2c+K.%2c+JEONG%2c+H.%2c+%26+Kim%2c+C.+(2018).+U.S.+Patent+Application+No.+16%2f016%2c303)
3. He S., Guo W., Wai E.W. Northern china heat pump application with the digital heating scroll compressor // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2006. Дата обращения: 09.04.2023. Режим доступа: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/797>
4. Patent USA N 5/248,244 1993 / 28.09.1993. Ho Y., Barito T.R., Hussein E. et al. Scroll compressor with a thermally responsive bypass valve. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US5248244A/en?q=Ho%2c+Y.%2c+Barito%2c+T.+R.%2c+Khalifa%2c+H.+E.%2c+%26+Giffune%2c+J.+P.+\(1993\).+U.S.+Patent+No.+5%2c248%2c244](https://patents.google.com/patent/US5248244A/en?q=Ho%2c+Y.%2c+Barito%2c+T.+R.%2c+Khalifa%2c+H.+E.%2c+%26+Giffune%2c+J.+P.+(1993).+U.S.+Patent+No.+5%2c248%2c244)
5. Patent USA N 4/818,195 1988 / 04.04.1989. Murayama A., Uchikawa N., Kuroshima R., et al. Scroll compressor with valved port for each compression chamber. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US4818195A/en?q=Murayama%2c+A.%2c+Uchikawa%2c+N.%2c+Kuroshima%2c+R.%2c+Kuno%2c+H.%2c+Arata%2c+T.%2c+%26+Shiibayashi%2c+M.+\(1989\).+U.S.+Patent+No.+4%2c818%2c195](https://patents.google.com/patent/US4818195A/en?q=Murayama%2c+A.%2c+Uchikawa%2c+N.%2c+Kuroshima%2c+R.%2c+Kuno%2c+H.%2c+Arata%2c+T.%2c+%26+Shiibayashi%2c+M.+(1989).+U.S.+Patent+No.+4%2c818%2c195)
6. Patent USA N 20/160,123,326 2016 / 05.05.2016 Fogt J.F., Kulkarni S.S. Scroll compressor. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US20160123326A1/en?q=Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Kulkarni%2c+S.+S.+\(2016\).+U.S.+Patent+Application+No.+14%2f529%2c219](https://patents.google.com/patent/US20160123326A1/en?q=Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Kulkarni%2c+S.+S.+(2016).+U.S.+Patent+Application+No.+14%2f529%2c219)
7. Patent USA N 9,435,340 2016 / 06.09.2016 Doepker R.J., Perevozchikov M.M., Stover R.C. Scroll compressor with variable volume ratio port in orbiting scroll. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US9435340B2/en?q=Doepker%2c+R.+J.%2c+Perevozchikov%2c+M.+M.%2c+%26+Stover%2c+R.+C.+\(2016\).+U.S.+Patent+No.+9%2c435%2c340.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office](https://patents.google.com/patent/US9435340B2/en?q=Doepker%2c+R.+J.%2c+Perevozchikov%2c+M.+M.%2c+%26+Stover%2c+R.+C.+(2016).+U.S.+Patent+No.+9%2c435%2c340.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office)
8. Patent USA N 9/458,847 2016 / 04.10.2016. Ignatiev K.M., Fogt J.F., Akei M. Scroll compressor having biasing system. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US9458847B2/en?q=Ignatiev%2c+K.+M.%2c+Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Akei%2c+M.+\(2016\).+U.S.+Patent+No.+9%2c458%2c847.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office](https://patents.google.com/patent/US9458847B2/en?q=Ignatiev%2c+K.+M.%2c+Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Akei%2c+M.+(2016).+U.S.+Patent+No.+9%2c458%2c847.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office)
9. Patent USA N 9/850,903 2017 / 26.12.2017. Perevozchikov M.M. Capacity modulated scroll compressor. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US9850903B2/en?q=Perevozchikov%2c+M.+M.+\(2017\).+U.S.+Patent+No.+9%2c850%2c903.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office](https://patents.google.com/patent/US9850903B2/en?q=Perevozchikov%2c+M.+M.+(2017).+U.S.+Patent+No.+9%2c850%2c903.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office)
10. Patent USA N 10/563,891 2020 / 18.02.2020. Smerud S.J., Mlsna E.S., Betthausen T.A., et al. Variable displacement scroll compressor. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US10563891B2/en?q=Smerud%2c+S.+J.%2c+Mlsna%2c+E.+S.%2c+Betthausen%2c+T.+A.%2c+%26+Kimball%2c+A.+P.+\(2018\).+U.S.+Patent+Application+No.+15%2f416%2c925](https://patents.google.com/patent/US10563891B2/en?q=Smerud%2c+S.+J.%2c+Mlsna%2c+E.+S.%2c+Betthausen%2c+T.+A.%2c+%26+Kimball%2c+A.+P.+(2018).+U.S.+Patent+Application+No.+15%2f416%2c925)
11. Patent USA N 10/605,243 2020 / 31.03.2020. Akei M., Doepker R.J., Zhou G., et al. Scroll compressor with oil management system. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US10605243B2/en?q=Akei%2c+M.%2c+Doepker%2c+R.+J.%2c+Zhou%2c+G.%2c+Sun%2c+Q.%2c+%26+Shu%2c+H.+\(2018\).+U.S.+Patent+Application+No.+16%2f047%2c675](https://patents.google.com/patent/US10605243B2/en?q=Akei%2c+M.%2c+Doepker%2c+R.+J.%2c+Zhou%2c+G.%2c+Sun%2c+Q.%2c+%26+Shu%2c+H.+(2018).+U.S.+Patent+Application+No.+16%2f047%2c675)
12. Hirano T., Hagimoto K., Matsuda S. Study on scroll compressor behavior in case of liquid refrigerant injection // Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 2011. Vol. 10, N 2. P. 227–238.
13. Shishov V.V., Talyzin M.S. Improving the energy efficiency of refrigeration plants by decreasing the temperature difference in air-cooled condensers // Thermal Engineering. 2015. Vol. 62, N 9. P. 652–655. doi: 10.1134/S0040601515090098
14. Arkharov A.M., Sychev V.V. Actual energy loss due to entropy generation in low-and high-temperature machines and plants //

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

Chemical and Petroleum Engineering. 2006. Vol. 42, N 1–2. P. 31–41. doi: 10.1007/s10556-006-0049-6

15. Arkharov A.M., Leont'ev A.I., Sychev V.V., et al. Problem of cold accumulation as a matter of energy saving and optimization of energy consumption // Chemical and Petroleum Engineering. 2009. Vol. 45, N 9. P. 621–623. doi: 10.1007/s10556-010-9225-9

16. Voronov V.A., Leonov V.P. Testing of a Scroll Expander in Various Modes // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, N 1–2. P. 33–36. doi: 10.1007/s10556-015-9993-3

17. Kolosov M.A., Borisenko A.V., Manylov V.V., et al. Losses of Power in Thermal Engines in Nonequilibrium Regenerative Heat Exchange // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54, N 3–4. P. 239–246. doi: 10.1007/s10556-018-0469-0

18. Wang B., Li X., Shi W. A general geometrical model of scroll compressors based on discretional initial angles of involute // International journal of refrigeration. 2005. Vol. 28, N 6. P. 958–966. doi: 10.1016/j.jrefrig.2005.01.015

19. Chen Y., Halm N.P., Groll E.A., et al. Mathematical modeling of scroll compressors—part I: compression process modeling // International Journal of Refrigeration. 2002. Vol. 25, N 6. P. 731–750. doi: 10.1016/S0140-7007(01)00071-8

20. Chen Y., Halm N.P., Braun J.E., et al. Mathematical modeling of scroll compressors—part II: overall scroll compressor modeling // International Journal of Refrigeration. 2002. Vol. 25, N 6. P. 751–764. doi: 10.1016/S0140-7007(01)00072-X

REFERENCES

1. Patent USA N 10/184,472 2019 / 22.01.2019. Ryu B, Ko Y, Kim B, et al. Scroll compressor and air conditioner including a scroll compressor. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US10184472B2/en?q=Ryu%2c+B.%2c+Ko%2c+Y.%2c+Kim%2c+B.%2c+Kim%2c+B.%2c+%26+Chung%2c+B.+\(2019\).+U.S.+Patent+Application+No.+10%2f184%2c472](https://patents.google.com/patent/US10184472B2/en?q=Ryu%2c+B.%2c+Ko%2c+Y.%2c+Kim%2c+B.%2c+Kim%2c+B.%2c+%26+Chung%2c+B.+(2019).+U.S.+Patent+Application+No.+10%2f184%2c472)

2. Patent USA N 10/590,931 2020 / 17.03.2020. Park H, Kang S, Lee K, et al. Scroll compressor and air conditioner having the same. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US10590931B2/en?q=Hansaem%2c+P.+A.+R.+K.%2c+Soojin%2c+K.+A.+N.+G.%2c+Lee%2c+K.%2c+JEONG%2c+H.%2c+%26+Kim%2c+C.+\(2018\).+U.S.+Patent+Application+No.+16%2f016%2c303](https://patents.google.com/patent/US10590931B2/en?q=Hansaem%2c+P.+A.+R.+K.%2c+Soojin%2c+K.+A.+N.+G.%2c+Lee%2c+K.%2c+JEONG%2c+H.%2c+%26+Kim%2c+C.+(2018).+U.S.+Patent+Application+No.+16%2f016%2c303)

3. He S, Guo W, Wai EW. Northern china heat pump application with the digital heating scroll compressor. In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2006. Accessed: 09.04.2023. Available from: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/797>

4. Patent USA N 5/248,244 1993 / 28.09.1993. Ho Y, Barito TR, Hussein E, et al. Scroll compressor with a thermally responsive bypass valve. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: [https://patents.google.com/patent/US5248244A/en?q=Ho%2c+Y.%2c+Barito%2c+T.+R.%2c+Khalifa%2c+H.+E.%2c+%26+Giffune%2c+J.+P.+\(1993\).+U.S.+Patent+No.+5%2c248%2c244](https://patents.google.com/patent/US5248244A/en?q=Ho%2c+Y.%2c+Barito%2c+T.+R.%2c+Khalifa%2c+H.+E.%2c+%26+Giffune%2c+J.+P.+(1993).+U.S.+Patent+No.+5%2c248%2c244)

5. Patent USA N 4/818,195 1988 / 04.04.1989. Murayama A, Uchikawa N, Kuroshima R, et al. Scroll compressor with valved port for each compression chamber. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US4818195A/en?q=Murayama%2c+A.%2c+Uchikawa%2c+N.%2c+Kuroshima%2c+R.%2c+Kuno%2c+H.%2c+Arata%2c+T.%2c+%26+Shiibayashi%2c+M.+\(1989\).+U.S.+Patent+No.+4%2c818%2c195](https://patents.google.com/patent/US4818195A/en?q=Murayama%2c+A.%2c+Uchikawa%2c+N.%2c+Kuroshima%2c+R.%2c+Kuno%2c+H.%2c+Arata%2c+T.%2c+%26+Shiibayashi%2c+M.+(1989).+U.S.+Patent+No.+4%2c818%2c195)

6. Patent USA N 20/160,123,326 2016 / 05.05.2016 Fogt JF, Kulkarni SS. Scroll compressor. Accessed: 09.04.2023. Available

21. Райнов А.А., Бронштейн М.Д., Бурмистров А.В., и др. Аналитический метод расчета сил и моментов в безмасляных спиральных вакуумных насосах и компрессорах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 7(652). С. 35–42.

22. Qin F., Shao S., Tian C., et al. Model simplification of scroll compressor with vapor refrigerant injection // International journal of green energy. 2016. Vol. 13, N 8. P. 803–811. doi: 10.1080/15435075.2016.1161626

23. Harrison JN, Koester S, Aihara R, et al. From CAD to 1D: a direct approach to modeling scroll compressors with multi-physics simulation // 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue; July 9–12, 2018; West Lafayette. [дата обращения: 09.04.2023] Доступ по ссылке: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2539/>

24. Uchikawa N., Terada H., Arata T. Scroll compressors for air conditioners // Hitachi Rev. 1987. Vol. 36, N 3. P. 155.

25. Косачевский В. А. О моделировании центральной области спирального компрессора // Вестник Международной академии холода. – 2018. – №. 3. – С. 45–52. doi: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-45-52

26. Косачевский В.А. Разработка метода расчета и анализ рабочего процесса спиральных компрессоров. дис... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1998. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000228178>

from: [https://patents.google.com/patent/US20160123326A1/en?q=Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Kulkarni%2c+S.+S.+\(2016\).+U.S.+Patent+Application+No.+14%2f529%2c219](https://patents.google.com/patent/US20160123326A1/en?q=Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Kulkarni%2c+S.+S.+(2016).+U.S.+Patent+Application+No.+14%2f529%2c219)

7. Patent USA N 9,435,340 2016 / 06.09.2016 Doepker RJ, Perevozchikov MM, Stover RC. Scroll compressor with variable volume ratio port in orbiting scroll. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US9435340B2/en?q=Doepker%2c+R.+J.%2c+Perevozchikov%2c+M.+M.%2c+%26+Stover%2c+R.+C.+\(2016\).+U.S.+Patent+No.+9%2c435%2c340.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office](https://patents.google.com/patent/US9435340B2/en?q=Doepker%2c+R.+J.%2c+Perevozchikov%2c+M.+M.%2c+%26+Stover%2c+R.+C.+(2016).+U.S.+Patent+No.+9%2c435%2c340.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office)

8. Patent USA N 9/458,847 2016 / 04.10.2016. Ignatiev KM, Fogt JF, Akei M. Scroll compressor having biasing system. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US9458847B2/en?q=Ignatiev%2c+K.+M.%2c+Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Akei%2c+M.+\(2016\).+U.S.+Patent+No.+9%2c458%2c847.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office](https://patents.google.com/patent/US9458847B2/en?q=Ignatiev%2c+K.+M.%2c+Fogt%2c+J.+F.%2c+%26+Akei%2c+M.+(2016).+U.S.+Patent+No.+9%2c458%2c847.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office)

9. Patent USA N 9/850,903 2017 / 26.12.2017. Perevozchikov MM. Capacity modulated scroll compressor. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US9850903B2/en?q=Perevozchikov%2c+M.+M.+\(2017\).+U.S.+Patent+No.+9%2c850%2c903.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office](https://patents.google.com/patent/US9850903B2/en?q=Perevozchikov%2c+M.+M.+(2017).+U.S.+Patent+No.+9%2c850%2c903.+Washington%2c+DC:+U.S.+Patent+and+Trademark+Office)

10. Patent USA N 10/563,891 2020 / 18.02.2020. Smerud SJ, Mlsna ES, Betthausen TA, et al. Variable displacement scroll compressor. Accessed: 09.04.2023. Available from: [https://patents.google.com/patent/US10563891B2/en?q=Smerud%2c+S.+J.%2c+Mlsna%2c+E.+S.%2c+Bethausen%2c+T.+A.%2c+%26+Kimball%2c+A.+P.+\(2018\).+U.S.+Patent+Application+No.+15%2f416%2c925](https://patents.google.com/patent/US10563891B2/en?q=Smerud%2c+S.+J.%2c+Mlsna%2c+E.+S.%2c+Bethausen%2c+T.+A.%2c+%26+Kimball%2c+A.+P.+(2018).+U.S.+Patent+Application+No.+15%2f416%2c925)

11. Patent USA N 10/605,243 2020 / 31.03.2020. Akei M, Doepker RJ, Zhou G, et al. Scroll compressor with oil management system. Accessed: 09.04.2023. Available from: <https://patents.google.com/patent/US10605243B2/en?q=Akei%2c+M.%2c+Doepker%2c+R.+J.>

%2c+Zhou%2c+G.%2c+Sun%2c+Q.%2c+%26+Shu%2c+H.+(2018).+U. S.+Patent+Application+No.+16%2f047%2c675.

12. Hirano T, Hagimoto K, Matsuda S. Study on scroll compressor behavior in case of liquid refrigerant injection. *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. 2011;10(2):227–238.

13. Shishov VV, Talyzin MS. Improving the energy efficiency of refrigeration plants by decreasing the temperature difference in air-cooled condensers. *Thermal Engineering*. 2015;62(9):652–655. doi: 10.1134/S0040601515090098

14. Arkharov AM, Sychev VV. Actual energy loss due to entropy generation in low-and high-temperature machines and plants. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2006;42(1-2):31–41. doi: 10.1007/s10556-006-0049-6

15. Arkharov AM, Leont'ev AI, Sychev VV, et al. Problem of cold accumulation as a matter of energy saving and optimization of energy consumption // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009;45(9):621–623. doi: 10.1007/s10556-010-9225-9

16. Voronov VA, Leonov VP. Testing of a Scroll Expander in Various Modes // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015;51(1-2):33–36. doi: 10.1007/s10556-015-9993-3

17. Kolosov MA, Borisenko AV, Manylov VV, et al. Losses of Power in Thermal Engines in Nonequilibrium Regenerative Heat Exchange. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018;54(3-4):239–246. doi: 10.1007/s10556-018-0469-0

18. Wang B, Li X, Shi W. A general geometrical model of scroll compressors based on discretional initial angles of involute. *International journal of refrigeration*. 2005;28(6):958–966. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2005.01.015

19. Chen Y, Halm NP, Groll EA, et al. Mathematical modeling of scroll compressors—part I: compression process modelling. *International Journal of Refrigeration*. 2002;25(6):731–750. doi: 10.1016/S0140-7007(01)00071-8

20. Chen Y, Halm NP, Braun JE, et al. Mathematical modeling of scroll compressors—part II: overall scroll compressor modelling. *International Journal of Refrigeration*. 2002;25(6):751–764. doi: 10.1016/S0140-7007(01)00072-X

21. Raikov AA, Bronstein MD, Burmistrov AV, et al. Analytical method for calculating forces and moments in oil-free scroll vacuum pumps and compressors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2014;7(652):35–42. (In Russ.).

22. Qin F, Shao S, Tian C, et al. Model simplification of scroll compressor with vapor refrigerant injection. *International journal of green energy*. 2016;13(8):803–811. doi: 10.1080/15435075.2016.1161626

23. JN Harrison, S Koester, R Aihara et al. From CAD to 1D: a direct approach to modeling scroll compressors with multi-physics simulation // 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue; July 9–12, 2018; West Lafayette. Available from: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3538&context=icec>

24. Uchikawa N, Terada H, Arata T. Scroll compressors for air conditioners. *Hitachi Rev*. 1987;36(3):155.

25. Kosachevsky VA. About modeling the central region of a scroll compressor. *Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda*. 2018. № 3. 45–52. (In Russ.). doi: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-45-52

26. Kosachevskiy VA. Razrabotka metoda rascheta i analiz rabocheho protsessa spiralnykh kompressorov [dissertation] Saint Petersburg; 1998. (In Russ.).

ОБ АВТОРАХ

* Жаров Антон Андреевич,

канд. техн. наук;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

Лефортовская наб., д. 1;

ORCID: 0000-0001-9945-0850;

eLibrary SPIN: 8581-1809;

e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Борисенко Артем Витальевич,

канд. техн. наук;

ORCID: 0000-0002-4818-3702;

eLibrary SPIN: 2859-5006;

e-mail: borart@bmstu.ru

Валякина Анна Викторовна,

канд. техн. наук;

ORCID: 0000-0002-7709-1209;

eLibrary SPIN: 7679-2022;

e-mail: valiakina@bmstu.ru

Быковская Вероника Саяровна;

ORCID: 0009-0008-8974-6066;

eLibrary SPIN: 5948-7187;

e-mail: veronika.makhmutova@student.bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Anton A. Zharov,

Cand. Sci. (Tech.);

address: 1 Lefortovskaja naberezhnaja, 105005, Moscow,

Russian Federation;

ORCID: 0000-0001-9945-0850;

eLibrary SPIN: 8581-1809;

e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Artem V. Borisenko,

Cand. Sci. (Tech.);

ORCID: 0000-0002-4818-3702;

eLibrary SPIN: 2859-5006;

e-mail: borart@bmstu.ru

Anna V. Valiakina,

Cand. Sci. (Tech.);

ORCID: 0000-0002-7709-1209;

eLibrary SPIN: 7679-2022;

e-mail: valiakina@bmstu.ru

Veronika S. Bykovskaya;

ORCID: 0009-0008-8974-6066;

eLibrary SPIN: 5948-7187;

e-mail: veronika.makhmutova@student.bmstu.ru

* Corresponding author