

УДК 621.514.5

# Математическая модель процесса регулирования производительности винтового однороторного компрессора регулятором производительности в виде поворотного регулировочного кольца

Д-р техн. наук В. А. ПРОНИН<sup>1</sup>, В. А. ЦВЕТКОВ<sup>2</sup>, А. В. КОВАНОВ<sup>3</sup>, Е. Н. МИХАЙЛОВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>2</sup>vatsvetkov@itmo.ru, <sup>3</sup>Kovanov76@yandex.ru, <sup>4</sup>mikhaylova\_en@mail.ru

Университет ИТМО

*На сегодняшний день, рынок винтовых компрессоров динамично развивается и требует создания надежных и эффективных, с точки зрения энергопотребления, технических решений. В данном ключе, одним из перспективных направлений разработок является развитие конструкций встроенных регуляторов производительности винтовых компрессоров. В работе описываются построение и работа встроенного регулятора производительности винтового однороторного компрессора (ВКО) с окружной формой зуба отсекателя в виде поворотного регулировочного кольца. Подробно рассматривается методика расчета объемной производительности ВКО в процессе ее регулирования путем математического моделирования. Результатом является развитие теоретической базы в области регулирования производительности ВКО, а также ее алгоритмизация.*

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

## Информация о статье:

Поступила в редакцию 01.03.2022, одобрена после рецензирования 12.04.2022, принята к печати 28.04.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-13-20

Язык статьи — русский

## Для цитирования:

Пронин В. А., Цветков В. А., Кованов А. В., Михайлова Е. Н. Математическая модель процесса регулирования производительности винтового однороторного компрессора регулятором производительности в виде поворотного регулировочного кольца // Вестник Международной академии холода. 2022. № 2. С. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-13-20

## Mathematical model for capacity regulation of screw single-rotor compressor by capacity control in the form of rotary adjustment ring

D. Sc. V. A. PRONIN<sup>1</sup>, V. A. TSVETKOV<sup>2</sup>, A. V. KOVANOV<sup>3</sup>, E. N. MIKHAILOVA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>2</sup>vatsvetkov@itmo.ru, <sup>3</sup>Kovanov76@yandex.ru, <sup>4</sup>mikhaylova\_en@mail.ru

ITMO University

*Currently, robust and energy efficient screw compressors are in high demand. One of the promising trends in this field is the development of the screw compressors with built-in capacity control. The article describes the design and operation principles of a built-in capacity control in the form of rotary adjustment ring for screw single-rotor compressor with a circular cut-off tooth. The calculation techniques for the volumetric capacity of screw single-rotor compressor during its regulation by mathematical modelling are described in detail. The results obtained contribute to the development and algorithmization of the theoretical base for the control of screw single-rotor compressor capacity.*

**Keywords:** screw compressor, compressor capacity, capacity control, rotary ring, single-rotor screw compressor, mathematical model.

## Article info:

Received 01/03/2022, approved after reviewing 12/04/2022, accepted 28/04/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-13-20

Article in Russian

## For citation:

Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Mikhailova E. N. Mathematical model for capacity regulation of screw single-rotor compressor by capacity control in the form of rotary adjustment ring. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 2. p. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-13-20

## Введение

В составе холодильных систем, систем кондиционирования воздуха, пневматики, нефтеперерабатывающих производств и др. компрессоры работают в режимах частичной нагрузки, что осуществляется за счет регулирования производительности данных машин. Зачастую регулирование производительности винтовых компрессоров производится встроенными регуляторами производительности. Для винтового однороторного компрессора (ВКО) авторами работы [1] предлагается конструкция встроенного регулятора производительности в виде поворотного кольца, ранее были обоснованы его преимущества в сравнении с альтернативными способами регулирования [2].

На настоящем этапе исследования будет целесообразным воспользоваться методом математического моделирования, который является универсальным и надежным для описания процессов, происходящих в технических системах.

Целью данной работы является разработка математической модели регулирования производительности винтового однороторного компрессора при помощи поворотного регулировочного кольца. Для достижения поставленной цели, определены следующие задачи.

1. Выполнить описание принципов построения и работы поворотного регулировочного кольца;
2. Обосновать конструкцию поворотного кольца, а именно: расположение и размеры окна, совпадающего с окном нагнетания, а также перепускного окна, осуществляющего перепуск части компримируемой среды в область всасывания;
3. Определить зависимость осевого перемещения перепускного окна на поворотном кольце от осевой координаты граней канавок винта-ротора (в зависимости от угла поворота отсекаателя);
4. Определить метод расчета эффективной площади перепускной зоны с изменением угла поворота отсекаателя;
5. Предложить расчетную модель процесса регулирования производительности ВКО;
6. Составить блок-схему программы, анализирующей эксплуатационные характеристики ВКО в процессе регулирования производительности при помощи поворотного кольца.

В литературных источниках [3]–[7] рассматриваются способы регулирования производительности ВКО типа Зиммерна [8], в основном при помощи встроенного регулятора — системы золотников. Однако для ВКО типа [1], с учетом особенностей его конструкции, регулирование производительности при помощи встроенного регулятора производительности ранее математически не описывалась. Предлагаемая модель позволит определить влияние геометрических параметров элементов поворотного кольца и их различного положения относительно окна нагнетания и канавок винта-ротора на процесс работы ВКО при регулировании его производительности.

## Принципы построения и работы поворотного регулировочного кольца

Поворотное кольцо предполагается установить в точке корпуса в области окон нагнетания ВКО. Планируемая конструкция устроена 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 ВКО при изменении его производительности. Управление поворотным кольцом обеспечивается внешним приводом и связано с режимом работы компрессора [9].

## Обоснование конструкции: расположение и размеры окна, совпадающего с окном нагнетания и перепускного окна

На рис. 1 представлено эскизное изображение положения регулировочного кольца (т. е. окна с прорезью на нагнетании и перепускного окна) при полной производительности. Эскиз имеет вид развертки винта-ротора, поворотного регулировочного кольца и части корпуса в прямоугольной системе координат. На схеме представлены обозначения:  $a$  — центральный винт-ротор;  $b$  — канавка (впадина) винта;  $v$  — окно всасывания;  $z$  — поворотное регулировочное кольцо;  $d$  — окно нагнетания;  $e$  — окно на поворотном кольце, совпадающее с окном нагнетания;  $ж$  — перепускное окно;  $з$  — направление вращения винта-ротора и поворотного кольца;  $I$  — первая канавка;  $II$  — вторая канавка; ЛГК — левая грань канавки; ПГК — правая грань канавки.

В соответствии с принципом работы ВКО, сначала ЛГК достигает пересечения с контуром перепускного окна, а затем ПГК. Здесь изображен момент подхода канавки  $I$  к окну нагнетания, при этом канавка расположена вне контура перепускного окна и не сообщается с канавкой  $II$ , объем которой еще не отсечен зубом отсекаателя от области всасывания. Таким образом, в данном положении поворотного регулировочного кольца отсутствует сообщение полости сжатия канавки  $I$  с полостью канавки  $II$ , а следовательно, и с областью всасывания. В данном случае ВКО работает в условиях полной производительности.

Для анализа характеристик управления поворотным кольцом (производительности ВКО) необходимо рассчитать площади окон нагнетания и перепуска в случае их перекрытия рассмотренной конструкцией поворотного кольца. Обратимся еще раз к рис. 1. Здесь  $x$  — перемещение поворотного кольца;  $dx$  — расстояние между начальным положением перепускного окна и точкой  $A$  на профиле канавки  $II$ . Геометрические характеристики поворотного кольца связаны с углом поворота отсекаателя  $\beta$  и  $\Delta x$ .

Когда ЛГК канавки  $II$  проходит через точку 2, перепускное отверстие открывается для канавки  $II$  и тогда часть рабочего вещества и рабочей полости, образованной канавкой  $I$  возвращается в область всасывания через полость канавки  $II$  (в область более низкого давления). Когда ПГК канавки  $I$  прошла через точку 4, а ЛГК этой канавки подходит к точке 5 и начинает сравниваться с контуром окна нагнетания, тем самым изолируясь от перепускного отверстия и полости канавки  $II$  внутренней поверхностью корпуса, рабочее вещество сжимается.

Для того, чтобы рассчитать геометрические характеристики предлагаемой конструкции окон на кольце,

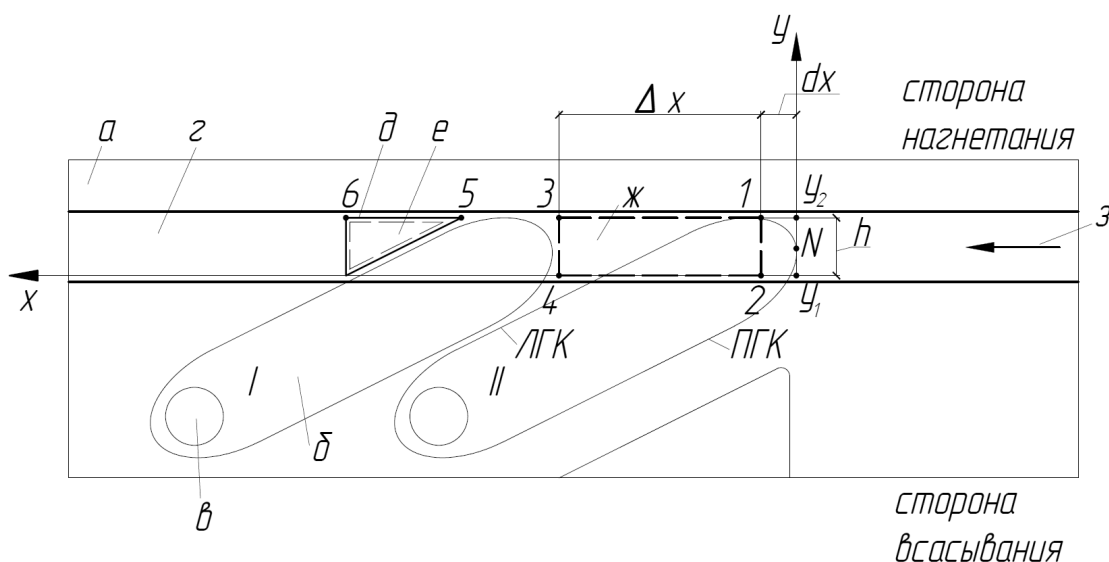


Рис. 1. Развертка винта-ротора (2 канавки), поворотного регулировочного кольца и части корпуса в плоской системе координат

Fig. 1. Development drawing of the rotor-screw (two grooves), rotary adjustment ring and a part of the body in plane coordinates

необходимо определить ограничивающий контур в области нагнетания. Перепускная область состоит из кривой ПГК канавки I, ЛГК канавки II, в остальном — из контура перепускного окна, проецирующегося на область канавки. Уравнения данных граничных контуров можно представить в виде уравнений ЛГК (1), ПГК (2), кривых, ограничивающих перепускное окно (3).

$$\begin{cases} x_L(\beta) = a_w \operatorname{tg} \beta + \frac{2r_0}{2 \cos \beta} - \left( a_w \operatorname{tg} \beta_{\text{вс}} - \frac{2r_0}{2 \cos \beta} \right); \\ y_L(\beta) = zR_1 (\beta - \beta_{\text{вс}}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_L(\beta)$  — абсцисса левой грани канавки винта-ротора;  $a_w$  — центральное расстояние между отсекателем и винтом-ротором, мм;  $\beta$  — угол поворота отсекателя, рад;  $r_0$  — радиус зуба отсекателя, мм;  $\beta_{\text{вс}}$  — угол поворота отсекателя в момент начала всасывания, рад;  $y_L(\beta)$  — ордината левой грани канавки винта-ротора;  $z$  — число зубьев отсекателя, шт.;  $R_1$  — наружный радиус винта-ротора, мм.

$$\begin{cases} x_{\text{П}}(\beta) = a_w \operatorname{tg} \beta - \frac{2r_0}{2 \cos \beta} - \left( a_w \operatorname{tg} \beta_{\text{вс}} - \frac{2r_0}{2 \cos \beta} \right); \\ y_{\text{П}}(\beta) = zR_1 (\beta - \beta_{\text{вс}}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_{\text{П}}(\beta)$  — абсцисса правой грани канавки винта-ротора;  $y_{\text{П}}(\beta)$  — ордината правой грани канавки винта-ротора.

$$\begin{cases} x_1 = dx \\ x_2 = dx + \Delta x \\ y_1 = 0 \\ y_2 = h \end{cases}, \quad (3)$$

где  $x_1$  — абсцисса реперной точки I;  $dx$  — расстояние между реперной точкой N и правой гранью перепускно-

го окна в его начальном положении, мм;  $x_2$  — абсцисса реперной точки 2;  $\Delta x$  — ширина перепускного окна, мм;  $y_1$  — ордината реперной точки I;  $y_2$  — ордината реперной точки 2;  $h$  — высота перепускного окна, мм.

### Определение зависимости осевого перемещения перепускного окна на поворотном кольце от осевой координаты граней канавок винта-ротора

В соответствии с характеристиками зацепления, необходимый угол наклона профилей канавок для перемещения на осевое расстояние  $\Delta x$  зависит от осевой координаты профилей канавок. Поэтому, необходимо зафиксировать значения таких углов, которые образуются в момент пересечения профилей ПГК и ЛГК с реперными точками перепускного окна. Назовем такие углы характерными углами. Они могут быть получены по осевым координатам профилей канавок.

ЛГК будет пересекаться с реперными точками последовательно, при этом углы вращения отсекателя равны  $\beta_{\text{ли}}$ . Согласно уравнению (1), координаты каждой характерной точки должны удовлетворять системе (4). Абсцисса и ордината реперных точек рассчитываются по уравнению (3). Аналогичным образом определяются, характерные углы  $\beta_{\text{пи}}$  в момент пересечения ПГК с реперными точками (5).

$$\begin{cases} x_{\text{Л}}(\beta_{\text{ли}}) = x_i \\ y_{\text{Л}}(\beta_{\text{ли}}) = y_i \end{cases}, \quad (4)$$

где  $i$  — реперные точки.

$$\begin{cases} x_{\text{П}}(\beta_{\text{пи}}) = x_i \\ y_{\text{П}}(\beta_{\text{пи}}) = y_i \end{cases}. \quad (5)$$

В табл. 1 представлены характерные углы и соответствующие им положения рабочих полостей.

Таблица 1  
Характерные углы поворота отсекаателя

Table 1

## Characteristic rotation angle of the cut-off

Характерный угол	Положение относительно реперных точек
$\beta_{Л1}$	ЛГК — 1
$\beta_{Л2}$	ЛГК — 2
$\beta_{Л3}$	ЛГК — 3
$\beta_{Л4}$	ЛГК — 4
$\beta_{П1}$	ПГК — 1
$\beta_{П2}$	ПГК — 2
$\beta_{П3}$	ПГК — 3
$\beta_{П4}$	ПГК — 4
$\beta_{НГ1}$	ЛГК — 5
$\beta_{НГ2}$	ПГК — 5
$\beta_{НГ3}$	ЛГК — 6
$\beta_{НГ4}$	ПГК — 6

### Метод расчета эффективной площади перепускной зоны при изменении угла поворота отсекаателя

Образование различных форм эффективной перепускной зоны при изменении угла вращения отсекаателя делает процесс ее расчета сложным. Одним из возможных методов является расчет путем вычисления двух областей —  $s_I$  и  $s_{II}$  по отдельности.  $s_I$  состоит из ЛГК и граничного контура, область  $s_{II}$  состоит также из ЛГК и граничного контура.  $s_I$  и  $s_{II}$  могут быть рассчитаны по уравнениям (6) и (7) (рис. 2).

$$s_I(\beta, \Delta x) = \begin{cases} 0 & (\beta \leq \beta_{Л1}) \\ \int_0^{\beta - \beta_{Л1}} (x_{Л}(\beta_{Л2} + \alpha) - x_1) z R_1 d\alpha & (\beta_{Л1} < \beta < \beta_1) \\ \int_0^{\Delta\beta(\beta)} (f_{Л}(\alpha, \beta) - x_1) z R_1 d\alpha & (\beta_1 < \beta < \beta_3) \\ \int_0^{\Delta\beta(\beta)} (x_{Л}(\beta + \alpha) - x_1) z R_1 d\alpha & (\beta_3 < \beta < \beta_2) \\ y_2 \Delta x - \int_0^{\Delta\beta(\beta)} (x_2 - x_{Л}(\beta + \alpha)) z R_1 d\alpha & (\beta_2 < \beta < \beta_{Л4}) \\ y_2 x & (\beta > \beta_{Л4}) \end{cases}; \quad (6)$$

$$s_{II}(\beta, \Delta x) = \begin{cases} 0 & (\beta \leq \beta_{П1}) \\ \int_0^{\beta - \beta_{П1}} (x_{П}(\beta_{П2} + \alpha) - x_1) z R_1 d\alpha & (\beta_{П1} < \beta < \beta_4) \\ \int_0^{\Delta\beta(\beta)} (f_{П}(\alpha, \beta) - x_1) z R_1 d\alpha & (\beta_4 < \beta < \beta_6) \\ \int_0^{\Delta\beta(\beta)} (x_{П}(\beta + \alpha) - x_1) z R_1 d\alpha & (\beta_6 < \beta < \beta_5) \\ y_2 \Delta x - \int_0^{\Delta\beta(\beta)} (x_2 - x_{П}(\beta + \alpha)) z R_1 d\alpha & (\beta_5 < \beta < \beta_{П4}) \\ y_2 x & (\beta \leq \beta_{П4}) \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\beta_1 = \min(\beta_{Л2}, \beta_{Л3})$ ;  $\beta_2 = \max(\beta_{Л2}, \beta_{Л3})$ ;  $\beta_3 = \beta_{Л1} + (y_2 / (z R_1))$ ;  $\beta_4 = \min(\beta_{П2}, \beta_{П3})$ ;  $\beta_5 = \max(\beta_{П2}, \beta_{П3})$ ;  $\beta_6 = \beta_{П1} + y_2 / (z R_1)$ ;  $\Delta\beta(\beta)$  — интервал интегрирования координаты  $y$ ;  $\alpha$  — угол поворота винта-ротора, рад.;  $f_{Л}(\alpha, \beta)$  и  $f_{П}(\alpha, \beta)$  — функции, используемые для вычисления значения направления координаты  $x$ ;

Исходя из геометрических характеристик разрабатываемого регулятора производительности, эффективная площадь перепускного окна  $s_{перепуск}$  может быть получена путем вычитания  $s_{II}$  из  $s_I$ , когда угол  $\beta$  меньше  $\beta_{Л4}$

и путем вычитания  $s_I$  из общей площади перепускного окна, когда угол  $\beta$  больше  $\beta_{Л4}$ . Расчетная формула представлена в виде (8).

$$s_{перепуск}(\beta, \Delta x) = \begin{cases} s_I(\beta, \Delta x) - s_{II}(\beta, \Delta x) & (\beta_{Л1} < \beta \leq \beta_{Л4}) \\ y_2 \Delta x - s_{II}(\beta, \Delta x) & (\beta_{Л4} < \beta \leq \beta_{П4}) \\ 0 & (\beta > \beta_{П4}) \end{cases}. \quad (8)$$

Как положение окна нагнетания, так и эффективная площадь нагнетания изменяются в зависимости от положения поворотного кольца. Это влияет на процесс нагнетания и значение степени сжатия. Для начала рассчитаем площадь окна нагнетания  $s_{НГ.Л}$ , состоящую из ЛГК и контура окна нагнетания, затем рассчитаем площадь нагнетания  $s_{НГ.П}$ , состоящую из ПГК и также контура окна нагнетания. Эффективная площадь нагнетания может быть получена из  $s_{НГ.Л}$ ,  $s_{НГ.П}$  и полной площади окна нагнетания  $s_{ПОЛН}$  в соответствии с уравнением (9) (рис. 3).

$$s_{НГ}(\beta, \Delta x) = \begin{cases} s_{ПОЛН}(\beta, \Delta x) - s_{НГ.Л}(\beta, \Delta x) & (\beta_{НГ1} < \beta \leq \beta_{НГ3}) \\ y_2 \Delta x - s_{II}(\beta, \Delta x) & (\beta_{НГ3} < \beta \leq \beta_{НГ4}) \\ 0 & (\beta > \beta_{НГ4}) \end{cases}. \quad (9)$$

### Расчетная модель процесса регулирования производительности ВКО

На основе уравнений сохранения энергии и неразрывности потока, могут быть получены уравнения процесса управления производительностью, необходимые для расчета термодинамических характеристик рабочей среды. Дифференциальное уравнение, описывающее внутреннюю энергию и массу рабочего вещества в рабочем объеме в зависимости угла поворота отсекаателя в процессе регулирования производительности можно записать в виде (10) [10]–[12].

$$\frac{d(m \cdot u)}{d\beta} = \sum \frac{dm_{ВХ} i_{ВХ}}{d\beta} - \sum \frac{dm_{ВЫХ} i_{ВЫХ}}{d\beta} + \frac{dW}{d\beta} - \frac{dQ}{d\beta}, \quad (10)$$

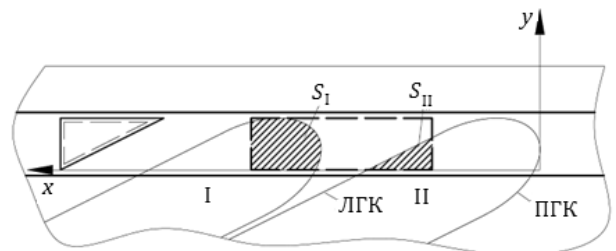


Рис. 2. Эскизное представление областей  $s_I$  и  $s_{II}$

Fig. 2. Sketch of the zones  $s_I$  and  $s_{II}$

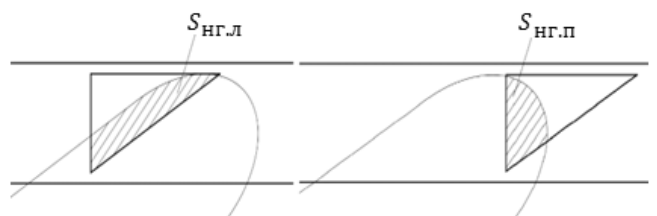


Рис. 3. Эскизное представление областей  $s_{НГ.Л}$  и  $s_{НГ.П}$

Fig. 3. Sketch of the zones  $s_{НГ.Л}$  and  $s_{НГ.П}$

где  $m$  — масса рабочего вещества, кг;  $u$  — скорость течения рабочей среды, м/с;  $dm_{вх}$  и  $i_{вх}$  — присоединяемые масса (кг) и ее удельная энтальпия (кДж/кг);  $dm_{вых}$  и  $i_{вых}$  — отсоединяемые масса (кг) и удельная энтальпия рабочего вещества (кДж/кг);  $W$  — работа, Дж;  $Q$  — теплота, Дж.

В действительности, количество теплоты, подведенной к газу от окружающей среды и отведенной от газа к окружающей среде, должно учитывать теплообмен между рабочей средой и корпусом компрессора. Основываясь на материалах, изложенных в данной работе, а также источниках [9, 11], запишем расчетные формулы (11)–(13).

$$\frac{dQ}{d\beta} = \frac{\alpha_T S(\beta)(T - T_{ст})}{\omega}, \quad (11)$$

где  $\alpha_T$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S(\beta)$  — площадь поверхности теплообмена, мм<sup>2</sup>;  $T$  — температура рабочей среды, К;  $T_{ст}$  — температура стенки, К;  $\omega$  — угловая скорость вращения винта, рад/с.

$$\alpha_T = \frac{\lambda \cdot Nu}{R_2 - \frac{\alpha_w}{\cos \beta}}, \quad (12)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Nu$  — число Нуссельта;  $R_2$  — радиус отсекаателя, мм.

$$S = \begin{cases} \int_{\beta}^{\beta_1} x_L(\beta) - x_{II}(\beta) z R_1 d\beta + \\ + \int_{\beta}^{\beta_{вых}} x_L(\beta') - x_{II}(\beta) z R_1 d\beta & (\beta_{вс} < \beta < \beta') \\ \int_{\beta}^{\beta_{вых}} x_L(\beta') - x_{II}(\beta) z R_1 d\beta & (\beta' < \beta < \beta_{вых}) \end{cases} \quad (13)$$

Изменение массы рабочего тела в рабочем объеме происходит следующим образом (14):

$$dm = dm_{вх} - dm_{вых}. \quad (14)$$

В процессе работы ВКО зазоры между внутренней поверхностью корпуса и винтом-ротором, а также зазоры между поверхностью канавок и зубом отсекаателя гораздо меньше, чем эффективная площадь перепускного окна. Поэтому, утечками через данные зазоры можем пренебречь в данной расчетной модели. Течение рабочей среды через перепускное отверстие можно рассматривать как изэнтропийный поток через сопло (15, 16) [12]–[15].

$$\text{При } \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \leq \frac{p_{нг}}{p(\beta, \Delta x)} \leq 1 : \\ m_{перепуск}(\beta, \Delta x) = \\ = C \cdot S_{перепуск}(\beta, \Delta x) \sqrt{\frac{2k \cdot p(\beta, \Delta x)}{(k-1)v_1(\beta, \Delta x)} \left( 1 - \frac{p_{вс}}{p(\beta, \Delta x)} \right)^{\frac{k}{k-1}}}, \quad (15)$$

где  $k$  — показатель изэнтропы;  $m_{перепуск}$  — массовый расход газа, проходящего через перепускное отверстие, кг/с;  $p$  — давление в рабочей полости, Па;  $p_{вс}$  — давление всасывания, Па;  $C$  — коэффициент расхода;  $v_1$  — удельный объем рабочего вещества в рабочей полости, м<sup>3</sup>/кг.

$$\text{При } 0 \leq \frac{p_{нг}}{p(\beta, \Delta x)} < \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} :$$

$$m_{перепуск}(\beta, \Delta x) = \\ = C \cdot S_{перепуск}(\beta, \Delta x) \sqrt{\frac{2k \cdot p(\beta, \Delta x)}{(k+1)v_1(\beta, \Delta x)}}. \quad (16)$$

Опираясь на вышеизложенные теоретические выкладки, запишем уравнение, описывающее значение теоретической объемной производительности ВКО в процессе ее регулирования поворотным кольцом (17).

$$V_{регул}(\beta_{п4}) = \\ = V_{полн} - v_{вс} \sum_{\beta=\beta_{л1}}^{\beta_{п4}} \frac{z R_1 \Delta \beta}{\omega} \cdot m_{перепуск}(\beta, \Delta x). \quad (17)$$

### Блок-схема программы, анализирующая эксплуатационные характеристики ВКО в процессе регулирования производительности при помощи поворотного кольца

Для проведения дальнейших исследований в данном направлении целесообразным является автоматизировать расчет современными инструментами программирования. Завершающий этап настоящей работы — создание графической модели, описывающей рассмотренные процессы в ВКО для их дальнейшей численной реализации средствами языков программирования. Блок-схема программы представлена на рис. 4.

### Заключение

В работе были описаны принципы построения и работы встроенного регулятора производительности ВКО в виде поворотного регулировочного кольца. Определены зависимости перемещения перепускного окна от координат граней канавок винта-ротора, предложен метод расчета эффективной площади перепускной зоны с изменением угла поворота отсекаателя и расчетная модель процесса регулирования производительности ВКО. Подготовлена графическая блок-схема для реализации программы расчета. Таким образом, в работе заложено теоретическое обоснование для проведения дальнейших исследований в области регулирования производительности ВКО, постановки численного эксперимента методами САЕ-моделирования, постановки натурного эксперимента и верификации результатов.

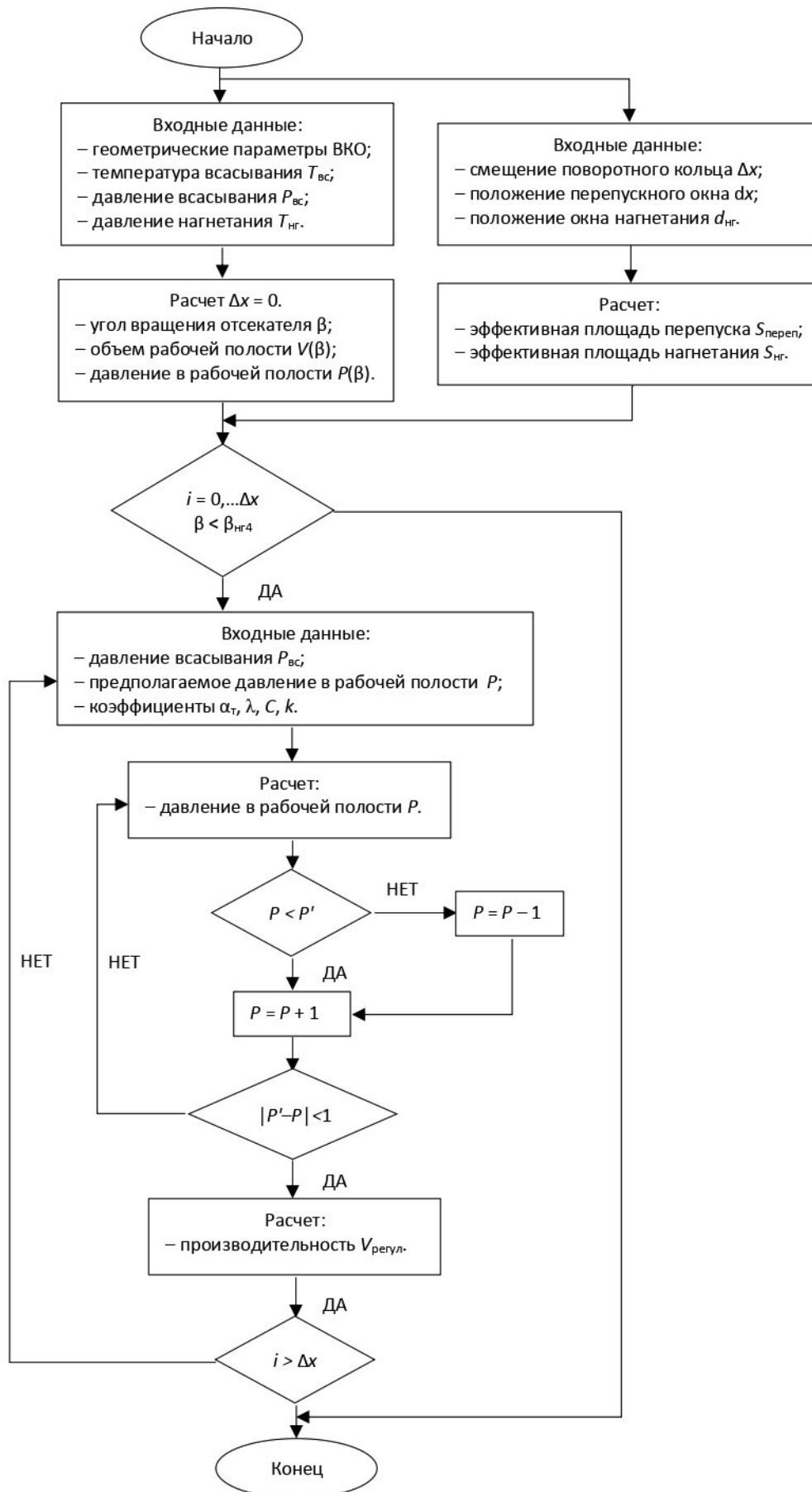


Рис. 4. Блок-схема программы

Fig. 4. Program flow chart

## Литература

## References

1. Винтовой однороторный маслозаполненный компрессор: Патент РФ 199030: МПК7 F 04 C 18/16 / Кузнецов Л. Г. Кузнецов Ю. Л., Пронин В. А., Бураков А. В., Божedomов А. В., Котлов Н. А.; заявитель и патентообладатель АО «Компрессор», — заявл. 2020114579; опубл. 07.08.2020, Бюл. № 22.
2. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Zhignovskaia D. V. Methods for regulating the performance of screw compressors and features applications for single rotor machines // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2442, pp. 030040.
3. Wu W, Zhang Z. Development of single screw compressor technologies and their tendency. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021. doi:10.1177/09544089211043011
4. Wang C. et al. A Review of Recent Research and Application Progress in Screw Machines //Machines. 2022. vol. 10. no. 1. p. 62.
5. Wu Y., Zhi R., Lei B., Wang W., Wang J., Li G., Wang H., Ma C. Slide Valves for Single-Screw Expanders Working Under Varied Operating Conditions. // *Energies*. 2016, 9, 478.
6. 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.
7. Wang, Z., Liu, Z., Liu, F., Yu, X., & Feng, Q. 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. 228 (8), 965–977. doi:10.1177/0957650914547605.
8. Zimmern B., Patel G. C. Design and operating characteristics of the zimmern single screw compressor. 1972.
9. Пронин В. А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики: дис... д. т. н.: 05.04.03. СПб., 1998. 226 с.
10. 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
11. Shen L. et al. A study of clearance height on the performance of single-screw expanders in small-scale organic Rankine cycles. // *Energy*. 2018. vol. 153. p. 45–55.
12. 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.
13. Xing Z. Screw compressor-theory, design and application. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2000, p. 124.
14. Rathore M. M. Thermal engineering. Tata McGraw-Hill Education, 2010.
15. Oosthuizen P. H., Carscallen W. E. Introduction to compressible fluid flow. CRC press, 2013.
1. *Screw single — rotor oil-filled compressor: Patent of the Russian Federation 199030: MPK7 F 04 C 18/16 / Kuznetsov L. G. Kuznetsov Yu. L., Pronin V. A., Burakov A. V., Bozhedomov A. V., Kotlov N. A.; applicant and patent holder of JSC «Compressor», — application 2020114579; publ. 07.08.2020, Byul. No. 22. (in Russian)*
2. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Zhignovskaia D. V. Methods for regulating the performance of screw compressors and features applications for single rotor machines. *AIP Conference Proceedings*, 2021, Vol. 2442, pp. 030040
3. Wu W, Zhang Z. Development of single screw compressor technologies and their tendency. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021. doi:10.1177/09544089211043011
4. Wang C. et al. A Review of Recent Research and Application Progress in Screw Machines. *Machines*. 2022. vol. 10. no. 1. p. 62.
5. Wu Y., Zhi R., Lei B., Wang W., Wang J., Li G., Wang H., Ma C. Slide Valves for Single-Screw Expanders Working Under Varied Operating Conditions. *Energies*. 2016, 9, 478.
6. 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.
7. Wang, Z., Liu, Z., Liu, F., Yu, X., & Feng, Q. 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. 228 (8), 965–977. doi:10.1177/0957650914547605
8. Zimmern B., Patel G. C. Design and operating characteristics of the zimmern single screw compressor. — 1972.
9. Pronin V. A. Single-rotor screw compressors for refrigeration and pneumatics: dis.doctor of technical sciences, St. Petersburg., 1998. 226 p. (in Russian)
10. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Zhignovskaia D. V., Vерболоз А. П. 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. (in Russian)
11. Shen L. et al. A study of clearance height on the performance of single-screw expanders in small-scale organic Rankine cycles. *Energy*. 2018. vol. 153. p. 45–55.
12. 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.
13. Xing Z. Screw compressor-theory, design and application. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2000, p. 124.
14. Rathore M. M. Thermal engineering. Tata McGraw-Hill Education, 2010.
15. Oosthuizen P. H., Carscallen W. E. Introduction to compressible fluid flow. CRC press, 2013.

## Сведения об авторах

**Пронин Владимир Александрович**

Д. т. н., профессор, ординарный 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

**Михайлова Екатерина Николаевна**

Магистрант, инженер факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, mikhaylova\_en@mail.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

**Mikhailova Ekaterina N.**

Undergraduate, engineer, Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, mikhaylova\_en@mail.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

30-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ,  
НАПИТКОВ И СЫРЬЯ ДЛЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

**ПРОД ЭКСПО** 6–10 февраля  
2023

Москва, ЦВК «Экспоцентр» 18+



«Продэкспо» – крупнейшая международная выставка продуктов питания и напитков в России и Восточной Европе. На «Продэкспо» представлено продовольствие со всего мира: от базовых продуктов и напитков на каждый день до изысканных деликатесов, а также органическое, спортивное питание, для здорового образа жизни, халяль, кошер, экзотические продукты.

**ТЕМАТИКИ ВЫСТАВКИ:**

- |   |   |
|---|---|
| ✓ Ингредиенты. Пищевые добавки. Сырье.  | ✓ Гастрономия.                                    |
| ✓ Птица, яйцо.                          | ✓ Продукты для здорового образа жизни.            |
| ✓ Молочная продукция. Сыры.             | ✓ Продукция «Халяль».                             |
| ✓ Мороженое.                            | ✓ Продукты для HORECA                             |
| ✓ Бакалея. Зернопродукты.               | ✓ Детское питание. Спортивное питание.            |
| ✓ Макароны изделия. Приправы, специи.   | ✓ Продукты для здорового образа жизни.            |
| ✓ Растительные жиры.                    | ✓ Овощи, фрукты, грибы, дикоросы.                 |
| ✓ Соки, воды. Безалкогольные напитки.   | ✓ Мед и продукты пчеловодства.                    |
| ✓ Замороженные продукты. Полуфабрикаты. | ✓ Торговые дома, оптово-распределительные центры. |
| ✓ Кондитерская продукция. Снэки.        | ✓ Маркетплейсы.                                   |
| ✓ Орехи, сухофрукты.                    | ✓ Корма для домашних животных.                    |
| ✓ Мед и продукты пчеловодства.          | ✓ Продэкспо Wine.                                 |
| ✓ Чай. Кофе.                            | ✓ Продэкспо Organic.                              |
| ✓ Рыба и морепродукты.                  | ✓ Продэкспо Pack&Technology.                      |
| ✓ Консервы. Соусы, кетчупы.             |   |

**Место проведения:**

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»,  
123100, г. Москва, Краснопресненская наб., 14

**Контакты:**

Дирекция выставок пищевой промышленности:  
Тел.: (499) 795–37–99, e-mail: info@expocentr.ru

[www.prod-expo.ru](http://www.prod-expo.ru)