

# АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТИХОХОДНОЙ СТУПЕНИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СООТНОШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ХОДА ПОРШНЯ

В. Л. Юша, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В работе представлены теоретические исследования по управлению линейным гидравлическим приводом путём изменения соотношения времени сжатия (прямого хода) и времени всасывания (обратного хода). Произведена оценка влияния режима работы привода на эффективность рабочего цикла.

**Ключевые слова:** линейный привод, закон движения, тихоходный длинноходовой поршневой компрессор, рабочий процесс времени прямого и обратного хода поршня, регулируемый привод.

## Введение

Традиционные приводы поршневых компрессорных агрегатов, такие как электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания и т.д., применяются либо без изменения номинальной частоты вращения коленчатого вала, либо с её регулированием для обеспечения работы компрессора с различной производительностью за счёт изменения времени рабочего цикла [1–3].

## Постановка задачи

Как показали проведённые ранее теоретические и экспериментальные исследования [4–8], в тихоходных длинноходовых компрессорных ступенях появляется возможность обеспечить сравнительно низкую температуру нагнетаемого газа (до 350–450 К) при величине  $\epsilon = P_H/P_{BC}$  до 100 в одной ступени [9, 10]. Такой «квазиизотермический» рабочий цикл может быть реализован за счёт выбора требуемых режимных и конструктивных параметров этих ступеней (время цикла, диаметр цилиндра, ход поршня) рис. 1 [11].

Можно предположить, что дополнительное влияние на рабочий процесс в таких ступенях в общем случае может оказывать неравномерность скорости поршня на различных участках рабочего цикла. Это связано с тем, что интенсивность повышения температуры на различных участках рабочего цикла существенно отличается, и изменение времени теплообмена между газом и стенками рабочей камеры может повлиять на эффективность охлаждения ступени. В данной работе рассмотрен один из вариантов такого режима работы, а именно рабочий цикл с различным соотношением времени прямого и обратного хода поршня.

## Теория

Описание расчётной методики подробно представлено в ранее опубликованных работах авторов [7, 8]. Основные допущения, принятые при выполнении расчётного анализа: газовая среда непрерывна и гомогенна; моделируемые процессы обратимы, равновесны и квазистатичны; параметры состояния рабочего газа изменяются

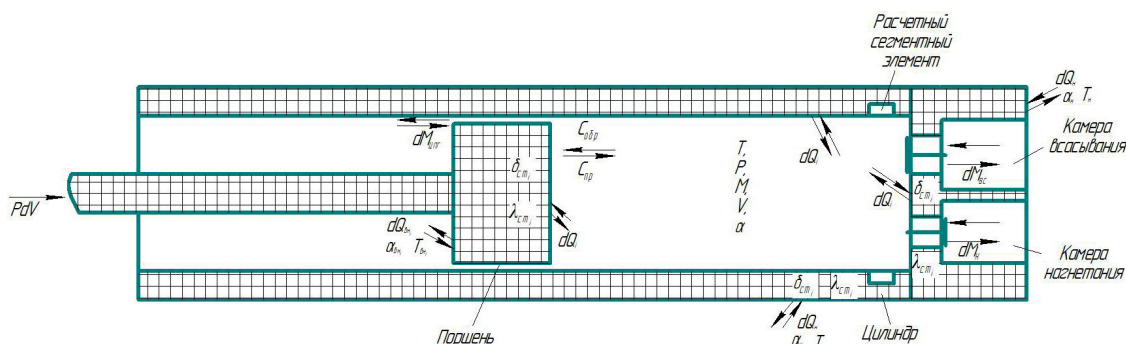


Рис. 1. Расчетная схема поршневой ступени с линейным приводом  
Fig. 1. The design scheme of the piston stage with linear drive

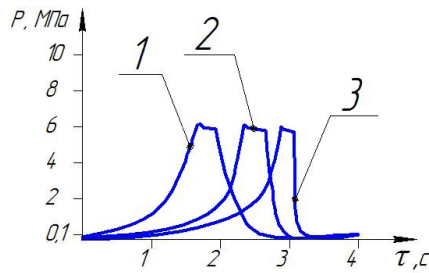


Рис. 2. Развёрнутые индикаторные диаграммы:

- 1 — соотношение времени сжатия и всасывания 1:1;
- 2 — соотношение времени сжатия и всасывания 2:1;
- 3 — соотношение времени сжатия и всасывания 3:1.

Параметры  $D_n = 0,02$  м;  $S = 0,2$  м

Fig. 2. Expanded indicator charts:

- 1 — ratio of compression and suction time 1:1;
- 2 — ratio of compression and suction time 2:1;
- 3 — ratio of compression and suction time 3:1.

The parameters  $D_n = 0,02$  m;  $S = 0,2$  m

одновременно по всему объёму рабочей камеры (ячейки); изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало; теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу; параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны; течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным; теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный и может быть описан формулой Ньютона – Рихмана; теплообмен на внешних поверхностях стенок деталей, формирующих рабочую камеру, определяется при постоянном по времени коэффициенте теплоотдачи, выбранном для рассматриваемого участка теплообменной поверхности; в стенках рабочей камеры отсутствуют внутренние источники тепла.

Методика расчёта включает в себя систему уравнений, включающих в себя уравнение закона сохранения энергии для тела переменной массы, уравнение массового баланса, уравнение состояния, следствие закона Джоуля для внутренней энергии газа, уравнения расхода газа через клапан и конвективного теплообмена между газом и стенками рабочей камеры. Математические модели компрессорной ступени такого типа классифицируются как модели второго уровня и широко применяются в практике исследования и проектирования компрессоров объёмного принципа действия [7, 8].

В основе методики расчета рабочего процесса тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней лежат следующие основные уравнения: уравнение первого закона термодинамики для тела переменной массы, уравнение состояния, уравнение сохранения массы, уравнение внутренней энергии газа [9, 10]:

$$U_n = U_{n-1} + dU_n,$$

где  $U_{n-1}$  — внутренняя энергия газа на  $(n-1)$ -м временном слое, Дж;  $dU_n$  — изменение внутренней энергии газа на  $n$ -м временном слое, Дж:

$$dU_n = dA_n - dQ_n \pm dm_n i_m,$$

где  $dQ_n$  — количество теплоты, отведенное от газа или подведенное к нему за время  $d\tau$ , Дж;  $dm_n$  — изменение массы газа в рабочей камере на  $n$ -м временном слое, кг;  $i_m$  — энтальпия массы газа  $dm_n$  на  $n$ -м временном слое, Дж/кг;  $dA_n$  — работа, совершенная над газом (или самим газом), Дж;

$$T_m = \frac{U_n}{m_n C_{BV}},$$

где  $T_m$  — температура сжимаемого газа, К;  $C_{BV}$  — теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(К·кг);  $m_n$  — масса сжимаемого газа, кг:

$$\begin{aligned} m_n &= m_{n-1} + dm; \\ p_m &= m_n RT_m / V_n, \end{aligned}$$

где  $p_m$  — давление сжимаемого газа на  $n$ -м временном слое, Па;  $R$  — газовая постоянная, Дж/(К·кг);  $V_n$  — объем газа на  $n$ -м временном слое, м<sup>3</sup>.

Изменение массы газа в рабочей камере определяли по уравнению истечения несжимаемой жидкости с дополнительным коэффициентом сжимаемости, коэффициенты расхода при течении газа через клапаны и зазоры определяли по известным зависимостям, а также по результатам собственных экспериментальных исследований. При расчете тепловых потоков между рабочим газом и внешней средой для наружных поверхностей деталей ступени использовали условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий коэффициент теплоотдачи между потоком охлаждающей жидкости и гладкой поверхностью, а также коэффициент оребрения. Для внутренних стенок рабочей камеры коэффициент теплоотдачи определяли по верифицированной в ходе разработки расчетной методики формуле И. К. Прилуцкого [11]. Систему уравнений решали численно методом конечных разностей, при разработке алго-

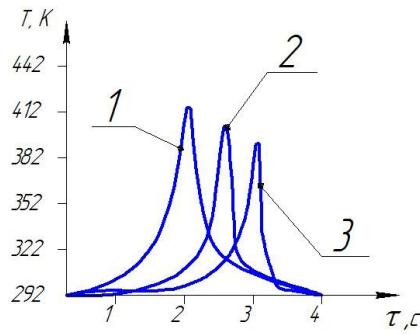


Рис. 3. Зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере за время цикла:

- 1 — соотношение времени сжатия и всасывания 1:1;
- 2 — соотношение времени сжатия и всасывания 2:1;
- 3 — соотношение времени сжатия и всасывания 3:1.

Параметры  $D_u = 0,02$  м;  $S = 0,2$  м

Fig. 3. Dependences

of the instantaneous gas temperature in the working chamber during the cycle:

- 1 — ratio of compression and suction time 1:1;
- 2 — ratio of compression and suction time 2:1;
- 3 — ratio of compression and suction time 3:1.

The parameters  $D_u = 0,02$  м;  $S = 0,2$  м

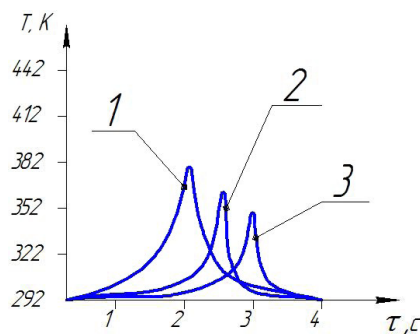


Рис. 4. Зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере за время цикла:

- 1 — соотношение времени сжатия и всасывания 1:1;
- 2 — соотношение времени сжатия и всасывания 2:1;
- 3 — соотношение времени сжатия и всасывания 3:1.

Параметры  $D_u = 0,02$  м;  $S = 0,8$  м

Fig. 4. Dependences

of the instantaneous gas temperature in the working chamber during the cycle:

- 1 — ratio of compression and suction time 1:1;
- 2 — ratio of compression and suction time 2:1;
- 3 — ratio of compression and suction time 3:1.

The parameters  $D_u = 0,02$  м;  $S = 0,8$  м

ритма был применен метод Эйлера второго порядка точности.

Результаты верификации показали, что представленная методика обеспечивает достаточно хорошую сходимость расчетных и экспериментальных результатов как для текущих параметров состояния рабочего газа (расхождение по мгновенному давлению не превышает 2,5%,

по мгновенной температуре — не более 8%), так и для средней температуры нагнетания (не более 5%). По коэффициенту подачи и индикаторному КПД расхождение между расчетными и экспериментальными результатами составляло 5...12 %.

Особенностью методики расчета в данном случае является то, что средние скорости движе-

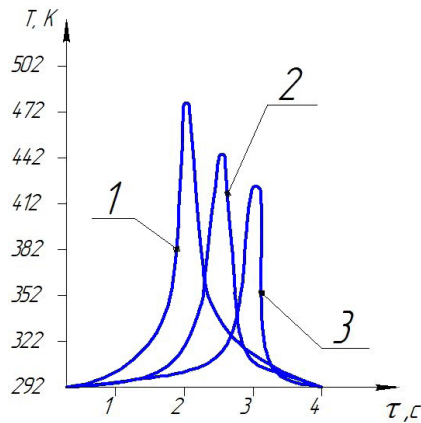


Рис. 5. Зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере за время цикла:

- 1 — соотношение времени сжатия и всасывания 1:1;
- 2 — соотношение времени сжатия и всасывания 2:1;
- 3 — соотношение времени сжатия и всасывания 3:1.

Параметры  $D_u = 0,05$  м;  $S = 0,2$  м

Fig. 5. Dependences

of the instantaneous gas temperature in the working chamber during the cycle:

- 1 — ratio of compression and suction time 1:1;
- 2 — ratio of compression and suction time 2:1;
- 3 — ratio of compression and suction time 3:1.

The parameters  $D_u = 0,05$  m;  $S = 0,2$  m

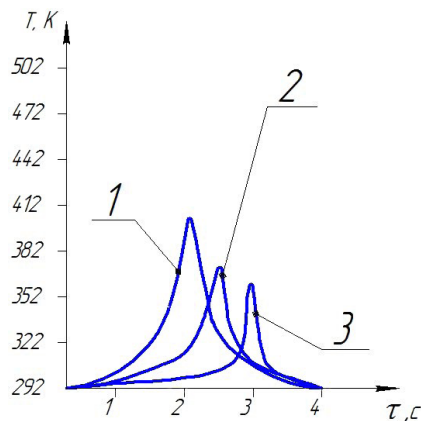


Рис. 6. Зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере за время цикла:

- 1 — соотношение времени сжатия и всасывания 1:1;
- 2 — соотношение времени сжатия и всасывания 2:1;
- 3 — соотношение времени сжатия и всасывания 3:1.

Параметры  $D_u = 0,05$  м;  $S = 0,8$  м

Fig. 6. Dependences

of the instantaneous gas temperature in the working chamber during the cycle:

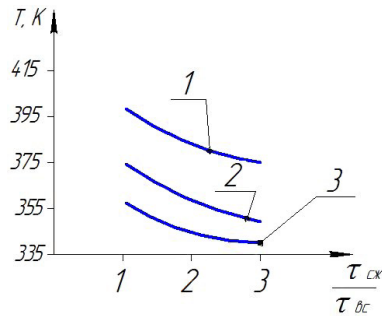
- 1 — ratio of compression and suction time 1:1;
- 2 — ratio of compression and suction time 2:1;
- 3 — ratio of compression and suction time 3:1.

The parameters  $D_u = 0,05$  m;  $S = 0,8$  m

ния поршня различны при прямом и обратном ходе. Обозначим их  $C_{пр}$  и  $C_{обр}$ .

Объектом исследования являются тихоходные ступени со следующими параметрами: геометрические — диаметр цилиндра — 0,02 м; 0,05 м; ход

поршня — 0,2...0,8 м; граничные условия — температура газа на всасывании — 293 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — 6 МПа; температура охлаждающей среды — 293 К, коэффициент теплоотдачи на внешней



**Рис. 7. Зависимости средней температуры нагнетаемого газа от соотношения времени сжатия и всасывания:**

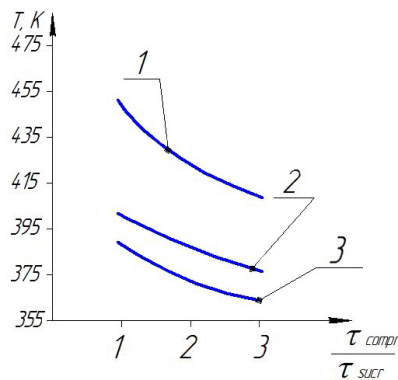
- 1 — время цикла 2 с;
- 2 — время цикла 3 с;
- 3 — время цикла 4 с.

Параметры  $D_u = 0,02$  м;  $S = 0,8$  м

**Fig. 7. Dependences of the average temperature of the injected gas on the ratio of compression and suction time:**

- 1 — cycle time 2 s;
- 2 — cycle time 3 s;
- 3 — cycle time 4 s.

The parameters  $D_u = 0,02$  m;  $S = 0,8$  m



**Рис. 8. Зависимости средней температуры нагнетаемого газа от соотношения времени сжатия и всасывания:**

- 1 — время цикла 2 с;
- 2 — время цикла 3 с;
- 3 — время цикла 4 с.

Параметры  $D_u = 0,05$  м;  $S = 0,8$  м

**Fig. 8. Dependences of the average temperature of the injected gas on the ratio of compression and suction time:**

- 1 — cycle time 2 s;
- 2 — cycle time 3 s;
- 3 — cycle time 4 s.

The parameters  $D_u = 0,05$  m;  $S = 0,8$  m

поверхности рабочей камеры — 2000 Вт/м<sup>2</sup>·К; физические условия — сжимаемый газ — воздух; начальные условия — параметры состояния газа в нижней мёртвой точке. Отношение времени движения от НМТ до ВМТ к времени движения от ВМТ до НМТ в теоретических экспериментах составляли — 1:1, 2:1, 3:1. Далее будем обозначать время сжатия (время прямого хода) —  $\tau_{сж}$ , а время всасывания (время обратного хода) —  $\tau_{вс}$ . Общее время цикла  $\tau = \tau_{сж} + \tau_{вс}$ .

### Результаты экспериментов

На рис. 2 представлены развёрнутые индикаторные диаграммы при различном соотношении времени движения от НМТ до ВМТ к времени движения от ВМТ до НМТ и давлении нагнетания 6 МПа. Видно смещение линии сжатия в правую часть диаграммы.

На рис. 3–6 представлено изменение мгновенной температуры сжимаемого газа в рабочей

камере при давлении нагнетания 6 МПа. Видно, что температура снижается при увеличении времени сжатия и уменьшении времени всасывания, то есть смещения линии сжатия в правую часть диаграммы.

На рис. 7, 8 представлены средние температуры нагнетания для различных соотношений времени сжатия и времени всасывания. Как видно из представленных результатов, изменение соотношения времени прямого и обратного хода поршня оказывает заметное влияние на температурный режим ступени. В частности, при увеличении времени процессов сжатия и нагнетания по отношению к времени всасывания и обратного расширения снижение величины средней температуры нагнетания может достигать 25–40 К.

### Заключение

Полученные результаты показали перспективы применения регулирования привода, направленного на получение различного соотношения времени прямого и обратного хода. Эффективность рабочего процесса при данном способе регулирования для тихоходных ступеней, связанная со снижением температуры сжимаемого газа, что также положительно скажется на теплонапряжённом состоянии деталей, формирующих рабочую камеру. Полученные результаты позволяют говорить об актуальности дальнейших теоретических и экспериментальных исследований влияния неравномерности скорости поршня на различных участках рабочего цикла на эффективность рабочего процесса поршневых тихоходных компрессорных ступеней.

### Список источников

1. White K. H. Infinitely Variable Capacity Control // International Compressor Engineering Conference. 1972. P. 47–51.
2. Song J. H. Full range stepless capacity regulation of piston compressor // Mech Eng. 2006. No. 9. P. 84–86.
3. Jiangming J., Weirong H., Lingbo T. Improved stepless capacity regulation for reciprocating compressors // Hydrocarbon Processing. 2009. No. 8. P. 43–47.
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Gromov A. Yu., Titov D. S., Scherban K. V. Verification of the operating processes calculation technique for slow speed oil-free stages of reciprocating medium-pressure compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2017. AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020042-1–02004-6. DOI:10.1063/1.4998862.
5. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Vasiliev V. K. The experimental research of the operating processes in slow speed stages of air reciprocating medium-pressure // Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2017. AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020039-1–020039-7. DOI:10.1063/1.4998859.
6. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Nedovenchanyi A. V., Sazhin B. S., Chizhikov M. A., Busarov I. S. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706.

7. Бусаров С. С., Громов А. Ю., Бусаров И. С., Титов Д. С., Васильев В. К. Модернизация методики расчёта процессов теплообмена в рабочей камере воздушного одноступенчатого тихоходного поршневого компрессора среднего давления на основании экспериментальных исследований // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 3. С. 14–18.

8. Бусаров С. С., Гошля Р. Ю., Громов А. Ю., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Титов Д. С. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 2016. № 6. С. 6–10.

9. Бусаров С. С., Васильев В. К., Бусаров И. С., Сажин Б. С., Панин Ю. Н. Параметрический анализ рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней на базе верифицированной методики расчёта // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 40–44.

10. Бусаров С. С., Васильев В. К., Бусаров И. С., Титов Д. С., Громов А. Ю. Параметрический анализ рабочих процессов холодильных и газовых тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней // КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2017: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Алматы: Изд-во АТУ, 2017. С. 47–51.

11. Громов А. Ю. Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2017. 213 с.

**ЮША Владимир Леонидович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Холодильная и компрессорная техника и технология».

SPIN-код: 1503-9666

AuthorID (РИНЦ): 610283

ORCID: 0000-0001-9858-7687

Адрес для переписки: yusha@omgtu.ru

**БУСАРОВ Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

**НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич**, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID (РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Адрес для переписки: lonewolf\_rus88@mail.ru

### Для цитирования

Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В. Анализ температурного режима тихоходной ступени при изменении соотношения времени прямого и обратного хода поршня // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 4. С. 21–28. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-21-28.

Статья поступила в редакцию 18.03.2018 г.

© В. Л. Юша, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный



# THE ANALYSIS OF TEMPERATURE REGIME OF LOW-SPEED STAGE WITH CHANGE IN RATIO OF TIME AND RETURN STROKE OF PISTON

V. L. Yusha, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The paper presents theoretical studies on the control of a linear hydraulic drive by changing the ratio of compression time (forward stroke) and suction time (return stroke). The effect of the operating mode of the drive on the efficiency of the working cycle is estimated.

**Keywords:** linear drive, the law of motion, low-speed long stroke piston compressor, forward and reverse stroke workflow, adjustable drive.

## References

1. White K. H. Infinitely Variable Capacity Control // International Compressor Engineering Conference. 1972. P. 47–51. (In Engl.).

2. Song J. H. Full range stepless capacity regulation of piston compressor // Mech Eng. 2006. No. 9. P. 84–86. (In Engl.).

3. Jiangming J., Weirong H., Lingbo T. Improved stepless capacity regulation for reciprocating compressors // Hydrocarbon Processing. 2009. No. 8. P. 43–47. (In Engl.).

4. Yusha V. L., Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Gromov A. Yu., Titov D. S., Scherban K. V. Verification of the operating processes calculation technique for slow speed oil-free stages of reciprocating medium-pressure compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2017. AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020042-1–02004-6. DOI: 10.1063/1.4998862. (In Engl.).

5. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Vasiliev V. K. The experimental research of the operating processes in slow speed stages of air reciprocating medium-pressure // Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2017. AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020039-1–020039-7. DOI:10.1063/1.4998859. (In Engl.).

6. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Nedovenchany A. V., Sazhin B. S., Chizhikov M. A., Busarov I. S. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706. (In Engl.).

7. Busarov S. S., Gromov A. Yu., Busarov I. S., Titov D. S., Vasiliev V. K. Modernizatsiya metodiki rascheta protsessov teploobmena v rabochey kamere vozdušnogo odnostupenchatogo tikhokhodnogo porshneвого kompressora srednego davleniya na osnovanii eksperimental'nykh issledovaniy [Modernization of the calculation procedure for heat exchange processes in the working chamber of an air single-stage low-speed reciprocating compressor of medium pressure on the basis of experimental studies] // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor Engineering and Pneumatics*. 2017. No. 3. P. 14–18. (In Russ.).

8. Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Gromov A. Yu., Nedovenchanyy A. V., Busarov I. S., Titov D. S. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov teploobmena v rabochey kamere tikhokhodnoy stupeni porshneвого kompressra [Mathematical

modeling of heat transfer processes in the working chamber of the slow-speed piston compressor stage] // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor Engineering and Pneumatics*. 2016. No. 6. P. 6–10. (In Russ.).

9. Busarov S. S., Vasiliev V. K., Busarov I. S., Sazhin B. S., Panin Yu. N. Parametricheskii analiz rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupeney na baze verifitsirovannoy metodiki rascheta [Parametric analysis of working processes of low-speed long-stroke lubricating piston compressor stages on the basis of verified calculation technique] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017. No. 4 (154). P. 40–44. (In Russ.).

10. Busarov S. S., Vasil'yev V. K., Busarov I. S., Titov D. S., Gromov A. Yu. Parametricheskii analiz rabochikh protsessov kholodil'nykh i gazovykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupeney [Parametric analysis of working processes of refrigerating and gas slow-running long-stroke lubricating piston compressor stages] // KAZAKHSTAN-KHOLOD 2017. *KAZAKHSTAN-COLD 2017*. Almaty: ATU Publ., 2017. P. 47–51. (In Russ.).

11. Gromov A. Yu. Razrabotka porshnevykh stupeney s lineynym privodom dlya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov i issledovaniye ikh rabochikh protsessov [Development of piston stairs with linear drive for low-flow compressor units and research of their working processes]. Kazan', 2017. 213 p. (In Russ.).

**YUSHA Vladimir Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

SPIN-code: 1503-9666

AuthorID (RSCI): 610283

ORCID: 0000-0001-9858-7687

Address for correspondence: yusha@omgtu.ru



**BUSAROV Sergey Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (RSCI): 610336; AuthorID (SCOPUS): 51560987400

**NEDOVENCHANY Aleksey Vasilievich**, Graduate Student of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Address for correspondence: lonewolf\_rus88@mail.ru

#### For citations

Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V. The analysis of temperature regime of low-speed stage with change in ratio of time and return stroke of piston // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2018. Vol. 2, no. 4. P. 21–28. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-21-28.

**Received 18 March 2018.**

© V. L. Yusha, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany