

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВНЫХ ЗАЗОРОВ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ

С. С. Бусаров, И. С. Бусаров, Д. С. Титов

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

Актуальная в настоящее время задача по определению зависимости условного зазора в цилиндропоршневом уплотнении от рабочего давления при неподвижном поршне решена авторами в настоящей работе. Проведённые экспериментальные исследования позволили получить зависимости условных зазоров от давления в цилиндропоршневом уплотнении тихоходных длинноходовых агрегатов при статических продувках. Полученные данные позволили определить наилучшее уплотнение для поршневых тихоходных длинноходовых агрегатов. В дальнейшем результаты исследований позволяют модернизировать существующую методику расчёта рабочих процессов тихоходных длинноходовых агрегатов.

Ключевые слова: длинноходовой поршневой компрессор, статические продувки, условный зазор.

Введение

Эффективность рабочего процесса тихоходных длинноходовых агрегатов в значительной степени зависит от герметичности рабочей камеры. Обусловлено это параметрами рабочего процесса и конструктивными особенностями рассматриваемого тихоходного агрегата [1, 2]. Основными факторами, влияющими на величину утечек в данном случае является величина перепада давления на уплотнении (в тихоходных ступенях перепад давления может достигать 10 МПа и более), и время рабочего цикла, которое может составлять 2...4 с [3–5]. В свою очередь, утечки в рабочей камере обусловлены наличием зазоров в подвижных узлах поршневой ступени, а именно цилиндропоршневом уплотнении и клапанах [6–8].

Постановка задачи

При определении утечек удобно использовать понятие условного зазора. Условным зазором называется усредненный зазор, произведение которого на периметр уплотнения даёт значение площади, через которую утекает газ или жидкость. Естественно, данную величину невозможно определить с помощью метрологических средств измерения, а можно получить только численно.

Рассматриваемые в данной работе статические зазоры в цилиндропоршневом уплотнении позволяют в дальнейшем для таких уплотнений, как плунжерная пара, лабиринтное уплотнение и уплотнение поршневыми кольцами модернизировать методику расчёта рабочих процессов тихоходных поршневых агрегатов. В совокупности с возникающими деформациями цилиндрической части ступеней таких агрегатов статические условные зазоры дают возможность определить полный условный зазор в уплотнении. Для ман-

жетных уплотнений в общем-то статический зазор является определяющим, поскольку при возникающих деформациях цилиндра манжетное уплотнение выбирает его за счёт упругого поджатия по всему периметру.

Сравнение различных типов цилиндропоршневых пар позволит экспериментально доказать преимущество одного из видов уплотнений и в дальнейшем усовершенствовать конструкцию именно данного типа применительно к длинноходовым тихоходным агрегатам.

Теория

Для проведения статических продувок и получения постоянной составляющей величины зазора разработан экспериментальный стенд и изготовлено четыре вида поршневых уплотнений (плунжерная пара, лабиринтное уплотнение, уплотнение с помощью поршневых колец, уплотнение с помощью манжет (рис. 1).

Схема стенда представлена на рис. 2.

Испытание включает следующие этапы:

1. Проверка испытательного стенда и его элементов на работоспособность и соответствие исходному состоянию.
2. Установка испытуемого поршня 2 в стенде.
3. Вывод экспериментального стенда на необходимый режим испытаний — обеспечение давления в рабочей камере 0,2...12 МПа.
4. Начало испытаний. Определение начальных параметров сжимаемого газа:
— температуры, давления (датчики 3, 7 соответственно).

Фиксация падения давления в рабочей камере от времени проведения испытаний.

5. Завершение испытаний. Внесение результатов испытаний в протокол.

Последовательность проведения испытаний выглядит следующим образом.



Рис. 1. Фото испытываемых уплотнений:
 а) гладкий поршень для плунжерной пары;
 б) поршень с лабиринтным уплотнением; в) поршень с кольцами;
 г) поршень с манжетами
Fig. 1. Photo of the test seals:
 a) smooth piston for plunger pair; b) piston with labyrinth seal;
 c) piston with rings; d) piston with cuffs

В соответствии с методикой расчёта выполняется следующая последовательность действий:

1. В рабочую камеру 1 закачивается газ под давлением 0,2...12 МПа. При установившейся температуре и зафиксированном давлении начинают проведение измерений.

2. Фиксируем начальное давление, температуру.

3. С помощью цифрового осциллографа 5 через усилитель 4 на монитор персонального компьютера 6 выводится график изменения давления внутри рабочей камеры.

4. Фиксируются конечное давление и время измерений, определяем массовый расход по формуле [8]:

$$M = \left(\frac{P_1 V}{RT_1} - \frac{P_2 V}{RT_2} \right) / \Delta t, \quad (1)$$

где R — газовая постоянная, Дж/кг·К; P_1 — давление газа в начальный момент времени, Па; P_2 — давление газа в конечный момент времени, Па; T_1 — температура газа в начальный момент времени, К; T_2 — температура газа в конечный момент времени, К; V — геометрический объем ёмкости, м³; Δt — время падения давления, с.

Крышка 8 служит для удержания испытуемого поршня 2, газ через зазоры в уплотнении выходит через канал 9 (рис. 2).

Уравнение массового расхода реального газа через зазор с применением поправочного коэффициента сжимаемости газа имеет следующий вид [5]:

$$M = \Phi \cdot \varepsilon_p \cdot \sqrt{\rho_1(P_1 - P_2)}, \quad (2)$$

где Φ — эквивалентная площадь зазора при данной методике, м²; P_1 , P_2 — давления газа перед и после щелевого канала, Па; ρ_1 — плотность газа перед щелевым каналом, кг/м³; ε_p — коэффициент сжимаемости.

С учётом (1) и (2) определяем площадь зазора. В свою очередь, эквивалентная площадь зазора:

$$\Phi = \alpha \cdot f, \quad (3)$$

где α — коэффициент расхода; f — площадь зазора, м².

Таким образом, зная периметр (P), определяется величина условного зазора [6]:

$$\delta_y = \Phi / P = \alpha \delta_p, \quad (4)$$

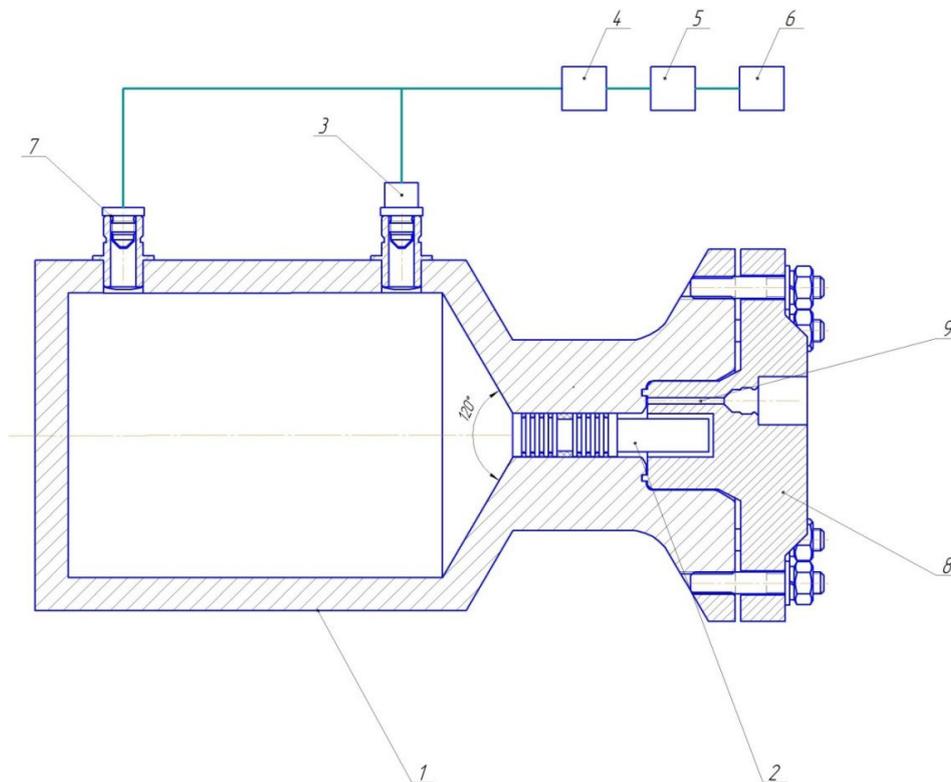


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда:
 1 — стенд; 2 — испытуемый поршень; 3 — датчик давления; 4 — усилитель;
 5 — цифровой осциллограф; 6 — персональный компьютер;
 7 — датчик температуры; 8 — крышка; 9 — канал для выхода газа
 Fig. 2. Schematic diagram of the experimental stand:
 1 — stand; 2 — test piston; 3 — pressure sensor; 4 — amplifier;
 5 — digital oscilloscope; 6 — personal computer;
 7 — temperature sensor; 8 — cover; 9 — gas outlet channel

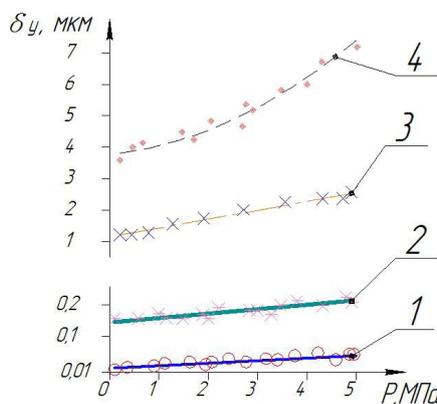


Рис. 3. Экспериментальные результаты определения условного зазора в цилиндропоршневом уплотнении (рабочее тело воздух):
 1 — манжетное уплотнение; 2 — кольцевое уплотнение;
 3 — лабиринтное уплотнение; 4 — плунжерная пара
 Fig. 3. Experimental results of determining the conditional clearance in the cylinder seal (working fluid air):
 1 — cup seal; 2 — ring seal; 3 — labyrinth seal; 4 — plunger pair

где δ_p — реальный зазор в цилиндропоршневом уплотнении, м.

Погрешность измерения мгновенной температуры при использовании бусинкового термистора [9–11].

$$\delta_T = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_t^2 + \delta_V^2 + \delta_F^2}, \quad (5)$$

где δ_M — погрешность мультиметра, определяемая погрешностью прибора, 0,34%; δ_t — погрешность термометра, определяемая погрешностью

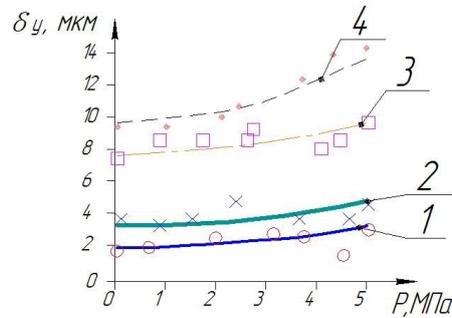


Рис. 4. Экспериментальные результаты определения условного зазора в цилиндропоршневом уплотнении (рабочее тело гелий):
 1 — манжетное уплотнение; 2 — кольцевое уплотнение;
 3 — лабиринтное уплотнение; 4 — плунжерная пара
Fig. 4. Experimental results of determining the conditional clearance in the cylinder seal (working fluid helium):
 1 — cup seal; 2 — ring seal; 3 — labyrinth seal; 4 — plunger pair

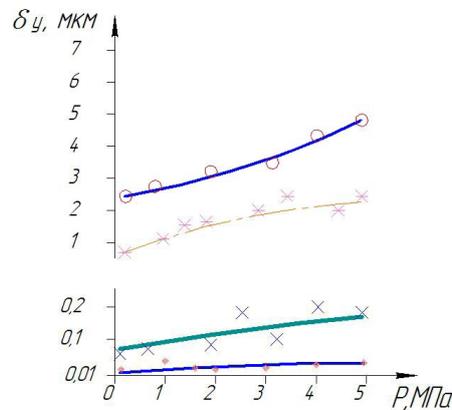


Рис. 5. Экспериментальные результаты определения условного зазора в цилиндропоршневом уплотнении (рабочее тело CO₂):
 1 — манжетное уплотнение; 2 — кольцевое уплотнение;
 3 — лабиринтное уплотнение; 4 — плунжерная пара
Fig. 5. Experimental results of determining the conditional clearance in the cylinder seal (working fluid CO₂):
 1 — cup seal; 2 — ring seal; 3 — labyrinth seal; 4 — plunger pair

прибора, 0,1%; δ_V — погрешность вольтметра, определяемая погрешностью прибора, 0,3%; δ_F — погрешность расчёта по полученной интерполированной формуле, 1,5%.

$$\delta_T = \sqrt{0,34^2 + 0,1^2 + 0,3^2 + 1,5^2} = 1,57 \%$$

Погрешность настройки времени цикла определяется точностью электронного осциллографа и составляет 0,05%.

Определим приборную погрешность [8] при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [12–15]:

$$\delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_{MH}^2 + \delta_0^2}, \quad (6)$$

где δ_A — относительная погрешность датчика давления, %; δ_{MH} — относительная погрешность образцового манометра, %; δ_0 — относительная погрешность осциллографа, %.

Относительная погрешность датчика давления по паспорту $\delta_A = 1,4\%$. Относительная погрешность образцового манометра $\delta_{MH} = 1\%$. Относительная погрешность для осциллографа определяется паспортом $\delta_0 = 0,05\%$. В данном случае приборная погрешность является общей погрешностью, поскольку методика измерения напряжения при выполнении эксперимента и при проведении тарировки совершенно одинаковы. Также не учитывалось влияние случайных факторов. Их можно будет исключить, если некоторые значения, полученные при экспериментальном измерении, будут выпадать из общей системы. Тогда общая погрешность датчика давления равна:

$$\delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{1,4^2 + 1^2 + 0,05^2} = 1,72 \%$$

Общая погрешность эксперимента определяется по формуле:

$$\delta_s = \sqrt{\delta_{AA}^2 + \delta_T^2 + \delta_c^2} = \sqrt{1,72^2 + 1,57^2 + 2^2} = 3,07 \%,$$

где δ_c — относительная погрешность секундомера, 2 %.

Результаты экспериментов

Результаты статических продувок представлены на рис. 3–5.

По результатам статических продувок цилиндропоршневых уплотнений выявлено, что при использовании манжетных уплотнений достигается минимальное значение условного зазора, следовательно, и минимальные утечки в цилиндропоршневом уплотнении.

Обсуждение результатов

Проведенные экспериментальные исследования показали, что условный статический зазор имеет наименьшее значение для манжетного уплотнения. Причём условный зазор зависит от физических свойств газа. Для более плотных газов (воздух, CO₂) газ утекает медленнее, чем для более лёгких, таких как гелий.

Характерно, что при увеличении давления условный зазор также увеличивается вследствие деформаций, что подтверждается ранее проводимыми исследованиями других авторов [3, 11].

Полученные зависимости условного зазора для диаметра 20 мм будут в дальнейшем использованы для расчёта общего зазора и введены в методику расчёта рабочего процесса тихоходного агрегата.

Выводы и заключение

Полученные экспериментальные зависимости условного зазора в цилиндропоршневом уплотнении показали значительную его зависимость от давления в камере, рода газа и типа самого уплотнения. Наилучшее уплотнение и, соответственно, наименьший зазор был получен при использовании манжетных уплотнений. Учитывая проблемы с негерметичностью рабочей камеры тихоходных агрегатов [1], можно сделать вывод о возможности применения манжетного уплотнения в таких агрегатах, как уплотнения, наиболее удовлетворяющего требованиям, предъявляемым к компрессорной технике.

В дальнейшем полученные величины зазоров при статических продувках могут быть использованы в методике расчёта рабочих процессов тихоходных поршневых длинноходовых агрегатов.

Список источников

1. 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 // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020039-1–020039-7. DOI: 10.1063/1.4998859.
2. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Гошля Р. Ю. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13–18.
3. Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Busarov I. S., Nedovenchanyj A. V. Experimental determination of the conventional clea-

rance in valves of oil-free reciprocating compressor units // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020043-1–020043-7. DOI: 10.1063/1.4998863.

4. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Буханец Д. И., Щербань К. В. Верификация методики расчёта рабочих процессов бесшмазочных тихоходных длинноходовых поршневых ступеней высокого давления // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 19–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-19-25.

5. Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К. [и др.] Поршневые компрессоры / под общ. ред. Б. С. Фотина. Л.: Машиностроение, 1987. 372 с.

6. Френкель М. И. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

7. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчёт. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колосс, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

8. Захаренко С. Е. Экспериментальное исследование протечек газа через щели // Труды Ленинградского политехнического института. 1953. № 2. С. 161–170.

9. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyj A. V., Sazhin D. S., Gromov A. Yu. Analysis of thermal state of intencely cooled long-stroke low-speed piston compressor stage // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 52 (9-10). P. 597–601. DOI: 10.1007/s10556-017-0239-4.

10. Кузнецов Л. Г., Молодова Ю. И., Прилуцкий А. И. Повышение герметичности поршневых компрессоров и детандеров // Холодильная техника. 1999. № 9. С. 24–25.

11. Кондратьева Т. Ф., Исаков В. П. Клапаны поршневых компрессоров. Л.: Машиностроение, 1983. 158 с.

12. Cochran W. G. Errors of measurement in statistics // Technometrics. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666. DOI: 10.2307/1267450.

13. Грановский В. С., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

14. Жлыков Г. П. Аппаратурное определение погрешностей цифровых приборов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 128 с.

15. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.

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

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

БУСАРОВ Игорь Сергеевич, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID (РИНЦ): 966534

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

ТИТОВ Даниил Сергеевич, соискатель по кафедре «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID (SCOPUS): 57195571233

Адрес для переписки: habr86@mail.ru

Для цитирования

Бусаров С. С., Бусаров И. С., Титов Д. С. Экспериментальное определение условных зазоров цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56.

Статья поступила в редакцию 04.03.2019 г.

© С. С. Бусаров, И. С. Бусаров, Д. С. Титов

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CONDITIONAL CLEARANCES FOR CYLINDER PISTON SEALS OF COMPRESSOR UNITS

S. S. Busarov, I. S. Busarov, D. S. Titov

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

The current problem of determining the dependence of the conditional clearance in the cylinder-piston seal on the operating pressure at a fixed piston is solved by the authors in this paper. The experimental studies have allowed to obtain the dependence of the conditional clearances on the pressure in the cylinder-piston seal of slow-speed long-stroke units with static purge. The data obtained made it possible to determine the best seal for piston low-speed long-stroke units. In the future, the results of research will allow to modernize the existing method of calculation of working processes of low-speed long-stroke units.

Keywords: long-stroke piston compressor, static purge, conditional clearance.

References

1. 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 // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020039-1 – 020039-7. DOI: 10.1063/1.4998859. (In Engl.).
2. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Goshlya R. Yu. Eksperimental'noye issledovaniye rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri vysokikh otnosheniyakh davleniy nagnetaniya k davleniyu vsasyvaniya [Experimental study of working processes of low-speed long-stroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 13 – 18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18. (In Russ.).
3. Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Busarov I. S., Nedovenchanyj A. V. Experimental determination of the conventional clearance in valves of oil-free reciprocating compressor units // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020043-1 – 020043-7. DOI: 10.1063/1.4998863. (In Engl.).
4. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Bukhanets D. I., Scherban' K. V. Verifikatsiya metodiki rascheta rabochikh protsessov bessmazochnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevnykh stupeney vysokogo davleniya [Verification of procedure for calculating the working processes of lubrication free low-speed longstroke piston high-pressure stages] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 19 – 25. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-19-25. (In Russ.).
5. Fotin B. S., Pirumov I. B., Prilutskiy I. K. [et al.] Porshnevyye kompressory [Piston compressors] / Ed. B. S. Fotin. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1987. 372 p. (In Russ.).
6. Frenkel' M. I. Porshnevyye kompressory [Piston compressors]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1969. 744 p. (In Russ.).
7. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vol. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed., Moscow: Koloss Publ., 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0.2000. (In Russ.).
8. Zakharenko S. E. Eksperimental'noye issledovaniye protechek gaza cherez shcheli [Experimental study of gas leaks through the cracks] // Trudy Leningradskogo politekhnicheskogo instituta. *Trudy Leningradskogo politekhnicheskogo instituta*. 1953. Vol. 2. P. 161 – 170. (In Russ.).
9. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Sazhin D. S., Gromov A. Yu. Analysis of thermal state of intencely cooled long-stroke low-speed piston compressor stage // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 52 (9-10). P. 597 – 601. DOI: 10.1007/s10556-017-0239-4. (In Engl.).
10. Kuznetsov L. G., Molodova Yu. I., Prilutskiy A. I. Povysheniye germetichnosti porshnevnykh kompressorov i detandorov [Increase of tightness of piston compressors and expanders] // Kholodil'naya tekhnika. *Kholodil'naya Tekhnika*. 1999. No. 9. P. 24 – 25. (In Russ.).
11. Kondrat'yeva T. F., Isakov V. P. Klapany porshnevnykh kompressorov [Pistoning compressor valves]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1983. 158 p. (In Russ.).
12. Cochran W. G. Errors of measurement in statistics // Technometrics. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637 – 666. DOI: 10.2307/1267450. (In Engl.).
13. Granovskiy V. S., Siraya T. N. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereniyakh [Methods for processing experimental data in measurements]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).
14. Zhlykov G. P. Apparturnoye opredeleniye pogreshnostey tsifrovyykh priborov [Instrumental determination of errors of digital devices]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984. 128 p. (In Russ.).
15. Kassandrova O. N., Lebedev V. V. Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya [Processing of observations]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 104 p. (In Russ.).

BUSAROV Sergey Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department. AuthorID (RSCI): 610336
AuthorID (SCOPUS): 51560987400



BUSAROV Igor Sergeyevich, Graduate Student of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (RSCI): 966534

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

TITOV Daniil Sergeyevich, PhD Candidate of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (SCOPUS): 57195571233

Address for correspondence: habr86@mail.ru

For citations

Busarov S. S., Busarov I. S., Titov D. S. Experimental determination of conditional clearances for cylinder piston seals of compressor units // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 50 – 56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56.

Received 4 March 2019.

© S. S. Busarov, I. S. Busarov, D. S. Titov