

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.512.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>



С.С. Бусаров  , Р.Э. Кобыльский

Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия

 bssi1980@mail.ru

СОЗДАНИЕ ПОРШНЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ РАБОТЫ ДЛЯ БЕССМАЗОЧНЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТИХОХОДНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. В проведённой работе, посвященной совершенствованию рабочего процесса бессмазочных малорасходных тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров среднего и высокого давления, проведены экспериментальные исследования, позволившие обосновать минимальное количество используемых манжетных уплотнений для обеспечения коэффициента подачи не менее 70%. Таким образом, для создания энергоэффективной машины необходимое число уплотнений равно семи. Проведён анализ повышения ресурса манжетных уплотнений, позволивший дать практические рекомендации по проектированию тихоходных поршневых компрессоров. Так, для обеспечения ресурса в 100 000 часов необходимо четырнадцать манжет, постепенный износ которых обеспечит и ресурс с требуемым уровнем коэффициента подачи. Дальнейшее повышение ресурса возможно при увеличении количества уплотнений, однако это приведёт и к росту габаритов компрессорной ступени.

Ключевые слова: тихоходный компрессор, ресурс, манжетные уплотнения, коэффициент подачи, эффективность рабочего процесса.

Для цитирования:

Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э. Создание поршневых уплотнений с повышенным ресурсом работы для бессмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>*S.S. Busarov* ✉, *R.E. Kobilskiy*

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

✉ [bssi1980@mail.ru](mailto:ssi1980@mail.ru)

DESIGN OF PISTON SEALS WITH INCREASED SERVICE LIFE FOR LUBRICATION-FREE LOW-FLOW LOW-SPEED RECIPROCATING COMPRESSORS OF MEDIUM AND HIGH PRESSURE

Abstract. Within the research devoted to improving the workflow of lubrication-free low-flow low-speed long-stroke piston compressors of medium and high pressure, we carried out experimental studies, which made it possible to substantiate the minimum number of cuff seals used to ensure a feed rate of at least 70%. To create an energy efficient machine, the required number of seals is seven. We analyzed the increase in the service life of cuff seals, which made it possible to give practical recommendations for the design of low-speed reciprocating compressors. Thus, to provide a service life of 100,000 hours, fourteen cuffs are needed: their gradual wear also provides a service life with the required level of feed rate. A further increase in the service life is possible with an increase in the number of seals, but this would increase the dimensions of the compressor stage as well.

Keywords: low-speed compressor, service life, lip seals, feed rate, workflow efficiency.

Citation:

S.S. Busarov, R.E. Kobilskiy, Design of piston seals with increased service life for lubrication-free low-flow low-speed reciprocating compressors of medium and high pressure, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 24–30, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>

Введение. Современные малорасходные бесшмазочные поршневые компрессоры нашли широкое применение в таких областях как медицина, приборостроение, низкотемпературные системы за счёт своей компактности, возможности подачи чистого газа [1, 2].

В настоящее время актуальной задачей является производство компрессоров для автономных условий эксплуатации таких как труднодоступные районы Арктики и Антарктики, пустыни, горные районы, в транспортных установках морского, подводного, наземного и космического базирования, для которых время автономной эксплуатации нередко доходит до 30 000 ч, а в некоторых случаях и более [3, 4].

Одним из функциональных элементов компрессоров, препятствующих длительной эксплуатации, являются цилиндропоршневые уплотнения. Современные уплотнения позволяют проработать без замены от 5 000 до 20 000 ч, что не соответствует современным требованиям [5, 6].

Современным направлением повышения эффективности компрессоров среднего и высокого давления можно считать создание тихоходных поршневых компрессоров, способных в одной ступени сжатия повышать давление в 100 ... 120 раз при допустимых температурах сжимаемого газа. Достигается это за счёт сочетания конструктивных и режимных параметров, которое не нашло отражение в существующих технологиях получения среднего и высокого давления. Такие компрессоры обладают низкой скоростью движения поршня – не более 0,5 м/с при диаметрах цилиндров – 0,02...0,08 м имеют относительно большой ход – S/D более 10. Это позволяет при наличии внешнего интенсивного охлаждения поршневой ступени хорошо охлаждать газ, добываясь “квазиизотермического” сжатия и минимизировать влияние мёртвого объёма [7–12].

Таким образом уникальное сочетание режимных и конструктивных параметров в тихоходных поршневых компрессорах предположительно позволит значительно повысить ресурс цилиндро-поршневых уплотнений.

Ранее были проведены исследования по определению максимальной толщины изнашиваемой части манжеты [13].

На основании износа при условиях работы характерных для режимов эксплуатации тихоходных поршневых компрессоров были получены результаты для одного уплотнения, выполненного из материалов Флубон 20 и Флувиз 20 – 40 000 ... 60 000 ч.

В данном исследовании необходимо определить минимальное количество манжет, позволяющее работать тихоходному поршневому компрессору с коэффициентом подачи не менее 0,7 при давлении нагнетания до 12 МПа и возможность дальнейшего повышения ресурса.

Объект исследования

Объектом исследования являются манжетное цилиндропоршневое уплотнение высотой – 0,0055 м, номинальным диаметром – 0,05 м, угол раскрытия кромки лепестка – 115°. Параметры тихоходной ступени – диаметр цилиндра – 0,05 м; ход поршня – 0,5 м; граничные условия – температура газа на всасывании – 293 К, давления всасывания – 0,1 МПа, давление нагнетания 1 – 12 МПа, сжимаемый газ – воздух.

Методика проведения исследования

При проведении экспериментальных исследований использовалась глухая камера сжатия без клапанов для исключения влияния других неплотностей рабочей камеры кроме неплотностей в цилиндропоршневом уплотнении.

Фотография экспериментального стенда представлена на рис. 1. Эксперимент проводился следующим образом: сжатие в рабочей камере 2 происходит за счёт работы гидравлического привода и передачи движения от гидроцилиндра 1, изменение давления и температуры газа в рабочей камере фиксируются датчиком давления 3 и датчиком температуры 4, сигнал визуализируется на цифровом осциллографе, значения параметров получают на основании ранее проведённых тарировок датчиков.

При проведении экспериментов увеличивается количество манжет до режимов, при которых давление практически перестаёт расти в камере сжатия.

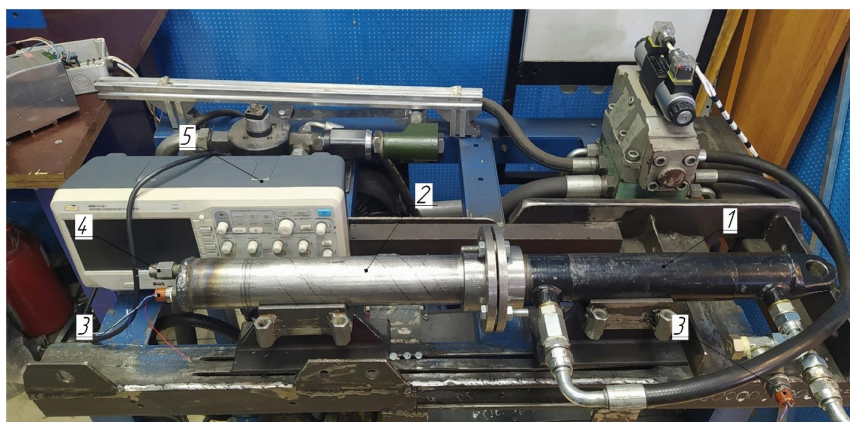


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда: 1 – Гидроцилиндр, 2 – Рабочая камера, 3 – Датчик давления, 4 – Датчик температуры, 5 – Цифровой осциллограф

Fig. 1. Photo of the experimental stand: 1 – Hydraulic cylinder, 2 – Working chamber, 3 – Pressure sensor, 4 – Temperature sensor, 5 – Digital oscilloscope

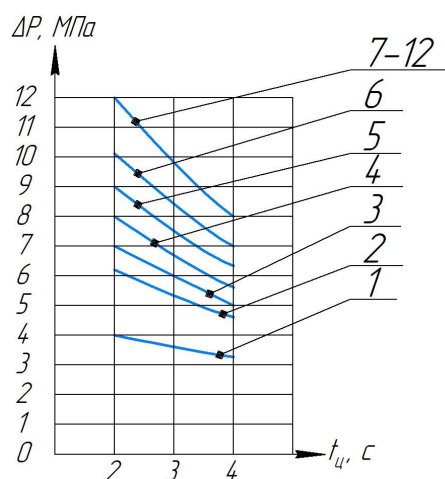


Рис. 2. График зависимости воспринимаемой поршнем разности давлений от времени рабочего цикла: номера кривых – число уплотнений

Fig. 2. Graph of the dependence of the pressure difference in the piston on the time of the working cycle: curve numbers show the number of seals

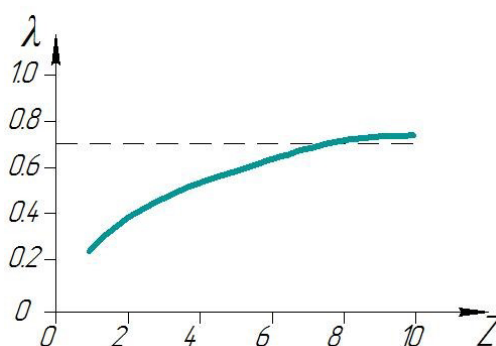


Рис. 3. Зависимость коэффициента подачи от количества манжет при $P_{н} = 10$ МПа и $\tau = 4$ с

Fig. 3. Dependence of the feed rate on the number of cuffs at $P_{dis} = 10$ MPa and $\tau = 4$ s

Полученные графики изменения максимального давления при различном времени цикла с постепенно увеличенным количеством манжет.

Последний график с количеством манжет 7–12 показывает наибольшее полученное давление, причем значение получаемого давления не зависит от дальнейшего повышения количества манжет. Таким образом в тихоходной ступени нет необходимости устанавливать более 7 манжет для получения давления 12 МПа.

Данный эксперимент был повторен на макетном образце тихоходного компрессора по методике согласно ранее опубликованным работам [14]. На рис. 3 представлены результаты проведенных исследований – зависимость коэффициента подачи от количества установленных манжетных уплотнений.

Результаты

Таким образом для обеспечения работы тихоходного компрессора с коэффициентом подачи не менее 0,7 необходимо установка 7 манжетных уплотнений, при этом ресурс работы составит до 60 000 ч. При износе первого манжетного уплотнения коэффициент подачи снизится, что по принятому критерию работоспособности будет означать неэффективную работу компрессора.

Для увеличения ресурса тихоходного компрессора необходимо увеличить количество манжетных уплотнений. На основании данных по воспринимаемым перепадам давлений каждого из уплотнений [15] можно определить величину пакета манжетных уплотнений. Так, например, для реализации ресурса в 100 000 ч уже необходимо уставка 14 уплотнений.

Заключение

Проведённые исследования позволили получить рекомендации для проектирования цилиндропоршневых уплотнений тихоходных длинноходовых компрессоров. Минимальное количество манжетных уплотнений для тихоходных компрессоров среднего и высокого давления должно составлять не менее семи, ресурс работы при этом составляет до 60 000 часов с коэффициентом подачи не менее 0,7. Увеличение ресурса до 100 000 часов приведёт к необходимости использования уплотнения содержащего четырнадцать манжет.

Разработанная методика теоретически может дать рекомендации по конструкции уплотнения тихоходных компрессоров для получения заданного ресурса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Юша В.Л., Громов А.Ю., Ушаков П.В. Анализ влияния температурных режимов поршневой длинноходовой компрессорной ступени на термодинамическую эффективность теплового насоса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 18–25. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25>

[2] Ramchandran G.T., Harrison J.A. Thermodynamic Chamber Modelling Approach for Oil Free and Oil Injected Twin Screw Compressors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012160. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012160

[3] Юша В.Л., Бусаров С.С. Методика расчёта действительной производительности одноступенчатых длинноходовых поршневых компрессоров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, №. 4. С. 9–15. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-9-15

[4] Байков И.Р., Китаев С.В., Файрушин Ш.З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров // ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ № 3 (63). 2015. С. 28–30.

[5] Захаренко В.П., Захаренко А.В. Отечественные инновационные разработки для решения задач повышения технического уровня импортозамещения в иностранных поршневых компрессорах // Низкотемпературная техника и системы низкопотенциальной энергетики. 2015. Т. 1, № 1. С. 19–24.

[6] Новиков И.И. Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах / И.И. Новиков, В.П. Захаренко, Б.С. Ландо; под общ. ред. И.И. Новикова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. – 238 с.: ил.

[7] Бусаров С.С., Юша В.Л. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89.

[8] Бусаров С.С. Эволюция конструкций тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней и актуальность их развития // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 12. – С. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469

[9] Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Громов А.Ю. Методика расчета толщины стенки лепестка манжетного цилиндропоршневого уплотнения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 26–31. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-26-31

- [10] **Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Yu.** Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (3). DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2
- [11] **Nedovenchanyi A.V.** The application of compact thermistors for the temperature conditions analysis of small-sized long-stroke low-speed stages of piston compressors / A.V. Nedovenchanyi, S.S. Busarov, A.Yu. Gromov, R.Yu. Goshlya, I.S. Busarov // *Procedia Eng.* – 2016. – Vol. 152. – P. 281–287.
- [12] **Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyi A.V.** Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under the changing ratio of the piston forward and backward stroke time // *AIP Conf. Proc.* – 2018. – Vol. 2007. – P.030058-1–030058-5.
- [13] **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.* – p. 297–302.
- [14] **Nedovenchanyi A.V., Yusha V.L., Busarov S.S.** Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low speed reciprocating compressor stages in compression of different gases // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54. P. 593–597. DOI: 10.1007/s10556-018-0520-1
- [15] **Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Кобыльский Р.Э., Синицин Н.Г., Муслова Л.А.** Верификация нагрузки, действующей на манжетное цилиндропоршневое уплотнения, работающего без смазки // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2021. – Вып. 10. – С. 658–667. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-658-667

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУСАРОВ Сергей Сергеевич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.
E-mail: bssi1980@mail.ru

КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович – ассистент, Омский государственный технический университет, без степени.
E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

REFERENCES

- [1] **V.L. Yusha, A.Yu. Gromov, P.V. Ushakov,** Analiz vliyaniya temperaturnykh rezhimov porshnevoy dlinnokhodovoy kompressornoy stupeni na termodinamicheskuyu effektivnost teplovogo nasosa // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye*. 2023. T. 7, № 1. S. 18–25. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25>
- [2] **G.T. Ramchandran, J.A. Harrison,** Thermodynamic Chamber Modelling Approach for Oil Free and Oil Injected Twin Screw Compressors // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012160. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012160
- [3] **V.L. Yusha, S.S. Busarov,** Metodika rascheta deystvitelnoy proizvoditelnosti odnostupenchatykh dlinnokhodovykh porshnevnykh kompressorov // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye*. 2020. T. 4, No. 4. S. 9–15. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-9-15
- [4] **I.R. Baykov, C.B. Kitayev, Sh.Z. Fayrushin,** Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnykh kompressorov // *DIAGNOSTIKA I NADEZH NOST ENERGOBORUDOVANIYa* № 3 (63). 2015. S. 28–30.

[5] **V.P. Zakharenko, A.V. Zakharenko**, Otechestvennyye innovatsionnyye razrabotki dlya resheniya zadach povysheniya tekhnicheskogo urovnya importozameshcheniya v inostrannykh porshnevnykh kompressora // Nizkotemperaturnaya tekhnika i sistemy nizkopotentsialnoy energetiki. 2015. T. 1, № 1. S. 19–24.

[6] **I.I. Novikov**, Bessmazochnyye porshnevyye uplotneniya v kompressorakh / I.I. Novikov, V.P. Zakharenko, B.S. Lando; pod obshch. red. I.I. Novikova. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1981. – 238 s.: il.

[7] **S.S. Busarov, V.L. Yusha**, Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24, № 4. S. 80–89.

[8] **S.S. Busarov**, Evolyutsiya konstruktivnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney i aktualnost ikh razvitiya // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – Vyp. 12. – S. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469

[9] **S.S. Busarov, R.E. Kobylskiy, A.Yu. Gromov**, Metodika rascheta tolshchiny stenki lepesta manzhetnogo tsilindroporshnevoogo uplotneniya // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2023. T. 7, № 1. S. 26–31. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-26-31

[10] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.Yu. Gromov**, Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53 (3). DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2

[11] **A.V. Nedovenchanyi**, The application of compact thermistors for the temperature conditions analysis of small-sized long-stroke low-speed stages of piston compressors / A.V. Nedovenchanyi, S.S. Busarov, A.Yu. Gromov, R.Yu. Goshlya, I.S. Busarov // Procedia Eng. – 2016. – Vol. 152. – R. 281–287.

[12] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyi**, Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under the changing ratio of the piston forward and backward stroke time // AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 2007. – P.030058-1–030058-5.

[13] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, R.Yu. Goshlya, A.V. Nedovenchanyi, B.S. Sazhin, M.A. Chizhikov, I.S. Busarov**, The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor, International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2016. – p. 297–302.

[14] **A.V. Nedovenchanyi, V.L. Yusha, S.S. Busarov**, Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low speed reciprocating compressor stages in compression of different gases // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. R. 593–597. DOI: 10.1007/s10556-018-0520-1

[15] **S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyi, R.E. Kobylskiy, N.G. Sinitsin, L.A. Muslova**, Verifikatsiya nagruzki, deystvuyushchey na manzhetnoye tsilindroporshnevoye uplotneniya, rabotayushchego bez smazki // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – Vyp. 10. – S. 658–667. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-658-667

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey S. BUSAROV – *Omsk State Technical University*.
E-mail: bssi1980@mail.ru

Roman E. KOBILSKIY – *Omsk State Technical University*.
E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

Поступила: 28.03.2023; Одобрена: 02.06.2023; Принята: 14.06.2023.
Submitted: 28.03.2023; Approved: 02.06.2023; Accepted: 14.06.2023.