

РЕСУРС РАБОТЫ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ СТУПЕНЕЙ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ

В. Л. Юша, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный,
И. С. Бусаров, Р. Э. Кобыльский, Д. С. Титов

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

В работе представлены теоретические исследования по увеличению ресурса работы поршневых уплотнений, выполненных на основе фторопласта путём изменения скорости движения поршня и, соответственно, более эффективного режима охлаждения. Предложена конструкция с двумя навстречу движущимися поршнями, позволяющая увеличить ресурс работы тихоходных длинноходовых ступеней.

Ключевые слова: тихоходный поршневой агрегат, манжетное уплотнение, особенность работы поршневого компрессора, увеличение ресурса работы в паре трения.

Введение

Повышение надежности и долговечности машин в условиях массового и серийного производства является одной из главных проблем современного машиностроения. Экономическое значение данного фактора вполне очевидно. Как показывает статистический анализ (в 75 случаях из 100), главной причиной выхода из строя машин является не их поломка, а износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения [1]. Вынужденные простои машин во время ремонта приводят к значительным экономическим потерям в большинстве отраслей промышленности, при этом каждый пятый рабочий входит в состав ремонтной службы. Также на нужды ремонта из производственных мощностей выделяется большой парк металлообрабатывающих станков. Таким образом, повышение износостойкости деталей машин является основным резервом увеличения их долговечности [2].

Постановка задачи

Основными узлами, наиболее сильно влияющими на ресурс работы поршневых компрессорных ступеней, являются: органы газораспределения — самодействующие клапаны и цилиндропоршневые уплотнения.

В существующих компрессорных установках при первом ТО поршневые уплотнения (в нашем случае манжеты) меняются в первую очередь [3]. Это обусловлено нагруженностью и постоянной работой пары трения: подвижным поршнем и неподвижным цилиндром, а также ответственностью данного узла, обеспечивающего требуемую производительность компрессора за счёт герметизации рабочей камеры. Основные требования, предъявляемые к конструкции уплотнений, — хорошее уплотнение зазора между поршнем и

рабочей поверхностью цилиндра, обеспечение допустимых износов как собственно уплотнения, так и рабочей поверхности цилиндра [4]. При нарушении контакта между рабочей поверхностью цилиндра и наружной поверхностью уплотнения образуются большие площади (зазоры) для перетекания газа. Скорость износа уплотнений имеет особо важное значение при высоких давлениях. Поэтому для нормальной работы уплотнения необходимо обеспечить совершенное прилегание кольца к стенкам цилиндра, а также сохранить этот контакт на протяжении возможно более длительного времени [2].

Объектом исследования в данной работе является тихоходная ступень поршневого агрегата с манжетным уплотнением, работающая без смазки проточной части [5]. При теоретических исследованиях ступени были заданы следующие параметры: диаметр цилиндра — 0,05 м; ход поршня — 0,5 м; температура охлаждающей среды — 293 К, охлаждающая среда — вода; сжимаемый газ — воздух; начальная температура газа — 293 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — до 10 МПа; время рабочего цикла — 2...4 с.

Тихоходная длинноходовая ступень подробно описана в работах [6, 7].

Одним из недостатков тихоходной длинноходной бессмазочной ступени является интенсивный износ манжетных уплотнений вследствие высокого перепада давления.

Одним из путей повышения ресурса манжетного уплотнения может служить применение усовершенствованной конструкции, представленной на рис. 1.

Теоретически увеличить ресурс работы ступени (манжетного уплотнения) можно путем применения конструкции поршневой ступени с двумя поршнями, движущимися навстречу друг другу. При данной конфигурации для обеспечения за-

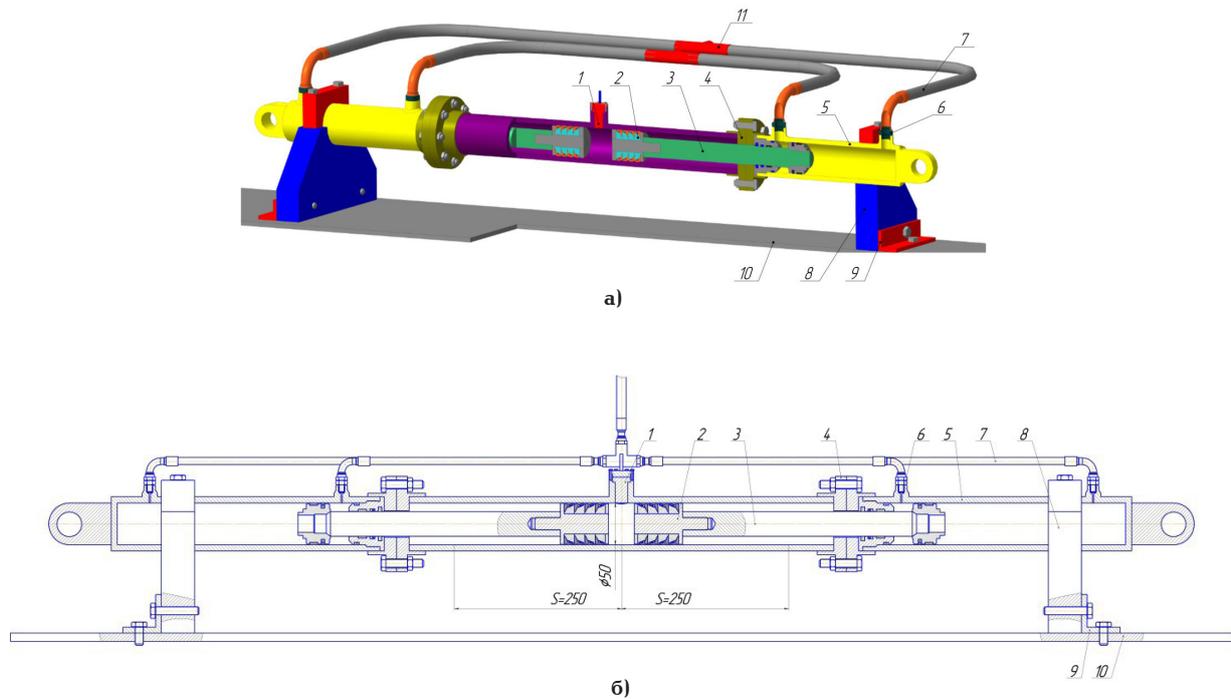


Рис. 1. Общий вид конструкции тихоходной ступени с двумя поршнями:

- а) 3D модель агрегата; б) разрез ступени;
 1 — клапанный узел; 2 — поршень в сборе; 3 — шток; 4 — фланец;
 5 — гидроцилиндр; 6 — бобышка; 7 — рукав высокого давления;
 8 — упор; 9 — уголок; 10 — рама; 11 — тройник

Fig. 1. General view of the design of low-speed stage with two pistons:

- а) 3D model of the unit; б) step cut;
 1 — valve assembly; 2 — piston assembly; 3 — stock; 4 — flange;
 5 — hydraulic cylinder; 6 — boss; 7 — high pressure hose;
 8 — stop; 9 — corner; 10 — frame; 11 — t-piece

данного рабочего объема каждому из поршней за один ход требуется пройти вдвое меньшее расстояние. Это означает меньшую скорость движения при фиксированном времени цикла.

Теория

Разработанная методика расчёта учитывает все процессы, происходящие в реальной тихоходной ступени с учётом газовых потоков через неплотности рабочей камеры.

Начальными параметрами при работе методики расчёта являются: начальная температура газа; давление в стандартной точке нагнетания и всасывания; относительная влажность воздуха; параметры рабочего тела: газовая постоянная, теплоемкость газа, коэффициент теплопроводности газа, конструктивные и режимные параметры объекта: диаметр цилиндра рабочей камеры, ход поршня, абсолютное значение величины мертвого объема, время цикла; параметры материала деталей, формирующих рабочую камеру: плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности; толщины стенок деталей; параметры клапанов, позволяющие рассчитать газовые потоки через них; приведённый коэффициент теплоотдачи на внешних поверхностях ступени.

Текущие параметры в создаваемом массиве данных: температура газа, давление газа, температура элементов стенок рабочей камеры,

тепловые потоки, масса газа в рабочей камере могут быть использованы для анализа рабочего процесса, построения различных графиков и зависимостей.

Интегральные характеристики ступени выводятся отдельным файлом: средняя температура нагнетаемого газа, коэффициент подачи, изотермический индикаторный КПД, мощность [8].

Расчетная схема подробно рассмотрена в работе и представлена на рис. 2.

Упрощающие допущения, принятые для создания данной методики расчёта, соответствуют общепринятым для данного класса математических моделей: рабочее тело является непрерывной и гомогенной средой; текущие параметры рабочего тела имеют осреднённое значение в каждой точке камеры сжатия; не учитывается изменение потенциальной и кинетической энергии рабочего тела; считается, что выделившаяся теплота при трении манжетных уплотнений полностью рассеивается в окружающую среду; не учитываются пульсация газа во всасывающем и нагнетательном патрубках (давления принимаются постоянными); истечение рабочего газа через самодействующие клапана и неплотности рабочей камеры считается адиабатным; теплообмен между газом и стенками рабочей камеры — конвективный; теплоотдача на внешних поверхностях стенок рабочей камеры, определяется при постоянном по времени ко-

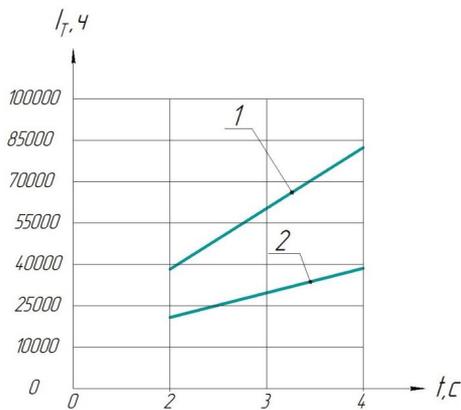


Рис. 3. Зависимость теоретического ресурса работы от времени цикла для рассмотренных вариантов конструкций тихоходных ступеней:

- 1 — тихоходная ступень с двумя поршнями;
2 — тихоходная ступень

Fig. 3. Dependence of the theoretical work resource on the cycle time for the considered options for the construction of low-speed stages:

- 1 — low-speed stage with two pistons;
2 — low-speed stage

$$t_{cp} = 0,2t_{bc} + 0,7t_{oxa} + 1,35n_0 + (\varepsilon - 1) \left(10,5 + 2,8 \frac{\Delta S}{S_{II}} - 0,2n_0 \right), \quad (8)$$

где t_{cp} — температура всасываемого газа; t_{oxa} — температура охлаждаемого воздуха; n_0 — частота вращения коленчатого вала; ε — степень повышения давления; $\frac{\Delta S}{S_{II}}$ — относительное перемещение поршня от ВМТ.

Тогда, учитывая выше представленные данные, получим среднюю температуру стенки цилиндра: $t_{cp} = 102^\circ\text{C}$.

Учитывая данные зависимости износа от температуры поверхности, получаем, что для данных параметров (температура в зоне трения меньше на 30 К) значение износа при меньшей температуре будет в 2,5 раза меньше [6, 13, 18].

Тогда, учитывая влияние температуры, теоретический ресурс работы определяется по формуле:

$$I_{T,1} = 2,5I_T.$$

Тогда с учетом температуры ресурс работы составит: $I_{T,1} = 19\,500$ ч. Таким образом, представленные расчеты показывают, что ресурс работы длинноходовой тихоходной ступени поршневого компрессора с интенсивным охлаждением цилиндра может составлять не менее 19000 ч.

Аналогичным методом определим теоретический ресурс для исследуемой длинноходовой ступени с двумя поршнями (рис. 1). С учетом времени цикла 2 с, при скорости скольжения 0,250 м/с ресурс работы без учета температуры составит: $I_T = 15\,600$ ч. Учитывая температуру 340 К (температура в зоне трения меньше на 30 К), рассчитаем теоретический ресурс работы по формуле: $I_T = 39\,000$ ч.

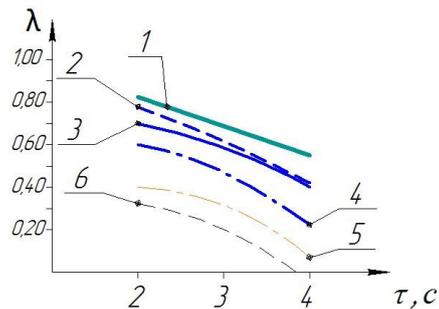


Рис. 4. Зависимость коэффициента подачи от времени цикла:

- 1, 3, 5 — обычная ступень с давлением нагнетания соответственно 3 МПа; 5 МПа; 10 МПа;

- 2, 4, 6 — ступень с двумя поршнями и давлением нагнетания соответственно 3 МПа; 5 МПа; 10 МПа

Fig. 4. Dependence of the feed rate on the cycle time:

- 1, 3, 5 — usual step with discharge pressure accordingly 3 MPa; 5 MPa; 10 MPa;

- 2, 4, 6 — stage with two pistons and discharge pressure, respectively, 3 MPa; 5 MPa; 10 MPa

Аналогичным методом определим теоретический ресурс для быстроходного компрессора. При скорости движения 1,5 м/с ресурс работы без учета температуры составит: $I_T = 2600$ ч.

С учетом влияния температуры (температура в зоне трения меньше на 20 К) теоретический ресурс работы составит: $I_T = 2600 \cdot 1,5 = 3900$ ч.

Результаты экспериментов

На рис. 3 представлены зависимости ресурса работы цилиндропоршневого уплотнения от времени цикла для тихоходных поршневых компрессорных агрегатов.

Однако тихоходные ступени имеют ряд особенностей, которые существенно влияют на рабочий процесс. В первую очередь это существенные утечки через уплотнения. Для схемы с двумя поршнями соответственно периметр цилиндропоршневого уплотнения, через который утекает газ из рабочей камеры, будет в 2 раза больше. Поэтому воспользуемся методикой, изложенной выше и определим, на сколько необходимо увеличить объем рабочей камеры (то есть ход поршня при одном и том же диаметре цилиндра), чтобы производительность осталась неизменной.

На графике, представленном на рис. 4, показана зависимость коэффициента подачи от времени цикла для рассматриваемых конструкций тихоходных ступеней [17, 19].

Из рис. 4 следует, что наличие двух поршней в конструкции тихоходной ступени уменьшает коэффициент подачи до 10% по сравнению с простой конструкцией тихоходной ступени, то есть, соответственно, необходимо увеличить ход поршня. Это приведёт к некоторому уменьшению ресурса по сравнению с данными, приведенными на рис. 3, но, как показано на рис. 5, ресурс для двухпоршневой ступени тем не ме-

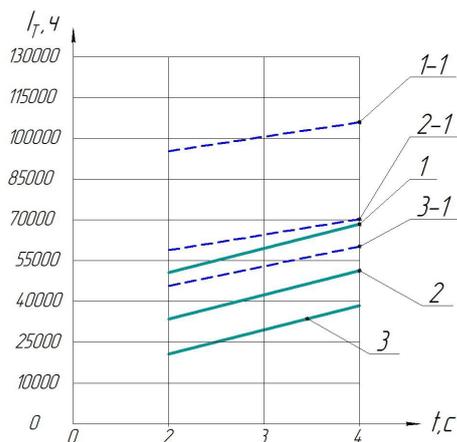


Рис. 5. Зависимость теоретического ресурса работы от времени цикла для рассмотренных вариантов конструкций тихоходных ступеней с учётом обеспечения равных производительностей: 1-1, 2-1, 3-1 — тихоходная ступень с двумя поршнями соответственно для давления нагнетания 3, 5, 10 МПа; 1, 2, 3 — тихоходная ступень соответственно для давления нагнетания 3, 5, 10 МПа

Fig. 5. Dependence of the theoretical service life on the cycle time for the considered options for the construction of low-speed stages, taking into account ensuring equal performance: 1-1, 2-1, 3-1 — low-speed stage with two pistons, respectively, for a discharge pressure of 3, 5, 10 MPa; 1, 2, 3 — low-speed stage, respectively, for a discharge pressure of 3, 5, 10 MPa

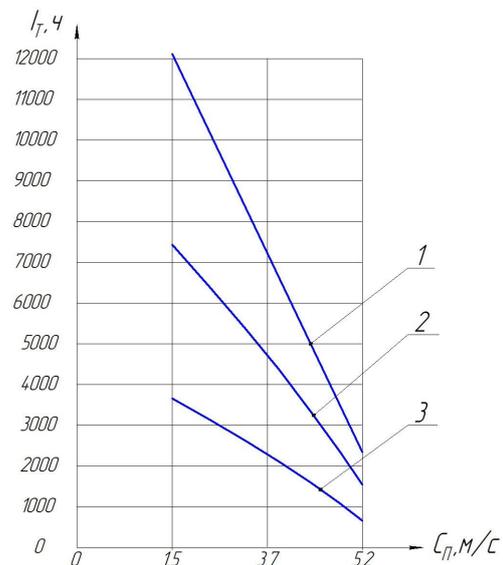


Рис. 6. Зависимость теоретического ресурса от скорости поршня для быстроходных компрессорных агрегатов: 1 — давление нагнетания 3 МПа; 2 — давление нагнетания 5 МПа; 3 — давление нагнетания 10 МПа

Fig. 6. Dependence of the theoretical resource on the piston speed for high-speed compressor units: 1 — discharge pressure 3 MPa; 2 — discharge pressure 5 MPa; 3 — discharge pressure 10 MPa

нее будет выше, чем для конструкции с одним поршнем.

На рис. 6 представлена оценочная зависимость ресурса работы цилиндропоршневого уплотнения от скорости поршня для быстроходных поршневых компрессорных агрегатов при существующих средних скоростях движения поршня в таких агрегатах.

Представленные на рис. 5, 6 результаты показали, что для тихоходных поршневых ступеней ресурс работы на порядок превышает ресурс работы быстроходных ступеней. Полученные результаты объясняются отличием режимов работы тихоходных поршневых ступеней от быстроходных.

Заключение

Проведённые теоретические результаты показали, что для тихоходных поршневых ступеней уменьшенная скорость движения поршня и, соответственно, более эффективный режим охлаждения позволяют увеличить ресурс работы поршневых уплотнений, выполненных на основе фторопласта. Так, для быстроходных ступеней были получены значения ресурса работы от 500 до 12000 ч (при средней скорости поршня 1,5...5,2 м/с), при использовании же тихоходных ступеней сжатия ресурс работы составил до 100000 ч при времени цикла от 2 до 4 с.

Предложенная в данной работе конструкция с двумя навстречу движущимися поршнями является одним из примеров возможной реализации конструкции, позволяющей увеличить ресурс работы тихоходных ступеней и в перспективе добиться ресурса работы более 120000 ч.

Список источников

1. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Баршадский Л. И. Надежность и долговечность машин. М.: Машиностроение, 1975. 408 с.
2. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 135 с.
3. Мыслицкий Е. Н., Киселев Г. Ф., Рахмилевич З. З. Техническое обслуживание и ремонт поршневых компрессорных машин. М.: Химия, 1978. 160 с.
4. Захаренко С. Е., Анисимов С. А., Карпов Г. В. [и др.]. Поршневые компрессоры. М.: Машиностроение, 1961. 151 с.
5. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. [и др.]. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Центр Наука и техника, 1995. 778 с.
6. Yusha V. L., Busarov S. S., Aistov I. P., Titov D. S., Vansovich K. A. Influence of wall thickness and properties of structural materials on the discharge temperature and strength characteristics of slow-speed long-stroke stages // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1876. P. 020040-1–020040-8. DOI: 10.1063/1.4998860.

7. Бусаров С. С., Юша В. Л., Недовенчаный А. В., Громов А. Ю. Анализ температурного состояния интенсивно охлаждаемой длинноходовой тихоходной ступени поршневого компрессора // Низкотемпературные и пищевые технологии в XX веке: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во ИТМО, 2015. С. 66–69.
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. Пластилин 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.
10. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М.: Машиностроение, 2005. 240 с. ISBN 5-217-03288-X.
11. 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.
12. Захаренко В. П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2001. 159 с.
13. 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.
14. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
15. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. [и др.]. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А. В. Чичинадзе. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
16. Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К. [и др.]. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. 872 с.
17. Френкель М. И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.
18. Пластилин П. И. Теория и расчёт поршневых компрессоров. М.: ВО Агропромиздат, 1987. 135 с.
19. 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. Р. 19–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-19-25.

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

SPIN-код: 1503-9666

AuthorID (РИНЦ): 610283

ORCID: 0000-0001-9858-7687

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

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

AuthorID (РИНЦ): 966534

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович, магистрант гр. ТМОМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.

AuthorID (SCOPUS): 57195571233

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

Адрес для переписки: lonewolf_rus88@mail.ru

Для цитирования

Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Кобыльский Р. Э., Титов Д. С. Ресурс работы тихоходных длинноходовых ступеней компрессорных агрегатов и возможные пути его увеличения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 42–49. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49.

Статья поступила в редакцию 04.03.2019 г.

© В. Л. Юша, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, И. С. Бусаров, Р. Э. Кобыльский, Д. С. Титов

SERVICE LIFE OF LOW-SPEED LONG-RUNNING STAGES OF COMPRESSOR UNITS AND POSSIBLE WAYS OF ITS INCREASE

V. L. Yusha, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany,
I. S. Busarov, R. E. Kobylskiy, D. S. Titov

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

The paper presents theoretical studies to increase the service life of piston seals made on the basis of fluoroplastic by changing the speed of movement of the piston and, accordingly, a more efficient cooling mode. A design with two oppositely moving pistons is proposed, which allows to increase the service life of low-speed long stroke stages.

Keywords: low-speed piston unit, lip seal, feature of the piston compressor, increase in service life in a friction pair.

References

1. Kostetskiy B. I., Nosovskiy I. G., Barshadskiy L. I. Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin [Reliability and durability of machines]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1975. 408 p. (In Russ.).
2. Kragel'skiy I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. Osnovy raschetov na treniye i iznos [Basics of calculations for friction and wearout]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1977. 135 p. (In Russ.).
3. Myslitskiy E. N., Kiselev G. F., Rakhmilevich Z. Z. Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont porshnevnykh kompressornykh mashin [Maintenance and repair of piston compressor machines]. M.: Khimiya Publ., 1978. 160 p. (In Russ.).
4. Zakharenko S. E., Anisimov S. A., Karpov G. V. [et al.]. Porshnevyye kompressory [Piston compressors]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1961. 151 p. (In Russ.).
5. Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A. [et al.]. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka) [The basics of tribology (friction, wearout, lubrication)] / Ed. A. V. Chichinadze. Moscow: Tsentr Nauka i Tekhnika Publ., 1995. 778 p. (In Russ.).
6. Yusha V. L., Busarov S. S., Aistov I. P., Titov D. S., Vansovich K. A. Influence of wall thickness and properties of structural materials on the discharge temperature and strength characteristics of slow-speed long-stroke stages // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1876. P. 020040-1 – 020040-8. DOI: 10.1063/1.4998860. (In Engl.).
7. Busarov S. S., Yusha V. L., Nedovenchany A. V., Gromov A. Yu. Analiz temperaturnogo sostoyaniya intensivno okhlazhdayemoy dlinnokhodovoy tikhokhodnoy stupeni porshneвого kompressora [Analysis of temperature condition rapidly cooled long-stroke stage piston compressor] // Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XX veke. Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XX veke. St. Petersburg: ITMO Publ., 2015. P. 66 – 69. (In Russ.).
8. Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Gromov A. Yu., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Titov D. S. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov teploobmena v rabochey kamere tikhokhodnoy stupeni porshneвого kompressora [Mathematical modeling of processes of heat exchange in the working chamber of low-speed reciprocating compressors stage] // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressors and Pneumatics*. 2016. No. 6. P. 6 – 10. (In Russ.).
9. 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. (In Russ.).
10. Mashkov Yu. K., Ovchar Z. N., Surikov V. I., Kalistratova L. F. Kompozitsionnyye materialy na osnove politetrafluoretilena. Strukturnaya modifikatsiya [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2005. 240 p. ISBN 5-217-03288-KH. (In Russ.).
11. 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.).
12. Zakharenko V. P. Osnovy teorii uplotneniy i sozdaniye porshnevnykh kompressorov bez smazki [Fundamentals of the theory of seals and the creation of piston compressors without lubrication]. St. Petersburg, 2001. 159 p. (In Russ.).
13. 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 otноsheniyakh davleniya 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.).
14. Myshkin N. K., Petrokovets M. I. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskkiye prilozheniya tribologii [Friction, lubrication, wearout. Physical foundations and technical applications of tribology]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2007. 368 p. (In Russ.).
15. Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A. [et al.]. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka) [The basics of tribology (friction, wearout, lubrication)] / Ed. A. V. Chichinadze. 2nd ed. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2001. 664 p. (In Russ.).
16. Fotin B. S., Pirumov I. B., Prilutskiy I. K. [et al.]. Porshnevyye kompressory [Piston compressors]. Leningrad:

Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye Publ., 1987. 372 p. (In Russ.).

17. Frenkel' M. I. Porshnevyye kompressory: teoriya, konstruktzii i osnovy proyektirovaniya [Piston compressors: theory, design, and design basics]. 3rd ed. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1969. 744 p. (In Russ.).

18. Plastinin P. I. Teoriya i raschet porshnevnykh kompressorov [Theory and design of piston compressors]. Moscow: VO Agropromizdat Publ., 1987. 135 p. (In Russ.).

19. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Bukhanets D. I., Shcherban' 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.).

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

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

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

AuthorID (RSCI): 966534

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

KOBYLSKIY Roman Eduardovich, Undergraduate Student gr. TMOM-181 of Elite Education and Magistracy Department.

AuthorID (SCOPUS): 57195571233

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

AuthorID (SCOPUS): 57195571233

Address for correspondence: lonewolf_rus88@mail.ru

For citations

Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Kobylskiy R. E., Titov D. S. Service life of work of low-speed long-running stages of compressor units and possible ways of its increase // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 42–49. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49.

Received 4 March 2019.

© V. L. Yusha, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, I. S. Busarov, R. E. Kobylskiy, D. S. Titov