

ПРОГНОЗНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОДОРОДНЫХ КОМПРЕССОРОВ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПОРШНЕВЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ СТУПЕНЕЙ

М. А. Сутягинский¹, Ю. А. Потапов¹, А. Ю. Громов²,
П. В. Ушаков², С. С. Бусаров³, В. Л. Юша⁴

¹АО «Группа компаний «Титан», Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 22

²АО «Научно-технический комплекс «Криогенная техника»,
Россия, 644105, г. Омск, ул. 22 Партсъезда, 97, корп. 1

³Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

⁴ОАО «Сибнефтетранспроект», Россия, 644042, г. Омск, ул. Иртышская набережная, 11/1

Рассмотрены вопросы, связанные с перспективой реализации технологий компримирования водорода на крупных химических, нефте- и газоперерабатывающих производствах посредством одно- или многоступенчатых компрессоров на базе тихоходных длинноходовых поршневых ступеней. Разработка и внедрение новых технологий являются одним из актуальных направлений развития отечественного компрессоростроения, обеспечивающих технологическую безопасность целого ряда отраслей, в том числе связанных с переработкой природных ископаемых. При разработке технического облика предполагаемой конструкции водородного компрессора и анализе его характеристик в качестве доминирующей предпосылки рассмотрена необходимость обеспечения безопасного температурного режима.

При расчётах использована многократно апробированная математическая модель рабочих процессов рассматриваемой компрессорной ступени с комбинированной схематизацией: квазистационарная модель рабочих процессов с сосредоточенными параметрами в проточной части и нестационарная модель теплопередачи через стенки рабочей камеры с граничными условиями третьего рода. Теоретически доказана высокая эффективность применения тихоходных поршневых ступеней в составе водородных компрессорных агрегатов, в том числе в качестве дожимных.

Ключевые слова: компрессор, водород, тихоходная длинноходовая ступень, рабочие процессы, математическое моделирование, температура нагнетания.

Для цитирования: Сутягинский М. А., Потапов Ю. А., Громов А. Ю., Ушаков П. В., Бусаров С. С., Юша В. Л. Прогнозный анализ температурных и энергетических характеристик технологических водородных компрессоров среднего давления на базе поршневых длинноходовых ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 30–37. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-30-37. EDN: MAGZXW.



© Сутягинский М. А., Потапов Ю. А., Громов А. Ю.,
Ушаков П. В., Бусаров С. С., Юша В. Л., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PREDICTIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE AND ENERGY FEATURES OF MEDIUM-PRESSURE PROCESS HYDROGEN COMPRESSORS BASED ON LONG-STROKE PISTON STAGES

M. A. Sutyaginskiy¹, Yu. A. Potapov¹, A. Yu. Gromov²,
P. V. Ushakov², S. S. Busarov³, V. L. Yusha⁴

¹JSC "Group of companies "Titan", Russia, Omsk, Gubkin Ave., 22, 644035

²JSC "Scientific and Technical Complex "Cryogenic Technique",
Russia, Omsk, 22 Partsyezda St., 97, bldg. 1, 644105

³Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

⁴OJSC "Sibnefttetranproekt", Russia, Omsk, Irtyshskaya Embankment, 11/1, 644042

The article considers the issues related to the prospects for implementing promising hydrogen compression technologies at large chemical, oil and gas processing plants using single- or multi-stage compressors based on low-speed long-stroke piston stages. The development and implementation of new technologies is one of the most urgent areas of development of the domestic compressor industry, ensuring the technological safety of a number of industries, including those related to the processing of natural resources. In developing the technical design of the proposed hydrogen compressor and analyzing its features, the need to ensure a safe temperature regime is considered as the dominant prerequisite.

The calculations use a repeatedly tested mathematical model of the working processes of the compressor stage with a combined schematization — a quasi-stationary model of working processes with concentrated parameters in the flow part and a non-stationary model of the heat transfer through the walls of the working chamber with boundary conditions of the third type. The authors demonstrate the high efficiency of using low-speed piston stages in hydrogen compressor units, also including booster stages.

Keywords: compressor, hydrogen, low-speed long-stroke stage, working processes, mathematical modeling, discharge temperature.

For citation: Sutyaginskiy M. A., Potapov Yu. A., Gromov A. Yu., Ushakov P. V., Busarov S. S., Yusha V. L. Predictive analysis of temperature and energy features of medium-pressure process hydrogen compressors based on long-stroke piston stages. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 30–37. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-30-37. EDN: MAGZXW.



© Sutyaginskiy M. A., Potapov Yu. A., Gromov A. Yu., Ushakov P. V., Busarov S. S., Yusha V. L., 2025.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Поршневые компрессоры среднего давления ($1,5 \text{ МПа} < P_n \leq 10,0 \text{ МПа}$) являются важнейшими компонентами различных технологических систем, а применительно к особо опасным промышленным объектам представляют собой существенные факторы воздействия на окружающую среду и человека, а также возможного экономического ущерба [1–11]. Очевидно, что применительно к водородным компрессорам последнее приобретает особую значимость. Однако технический уровень существующих технологических поршневых компрессоров далеко не всегда обеспечивает эти требования, в том числе касающиеся регламента по обеспечению их температурного режима [3, 4, 6–8].

Применительно к поршневым компрессорам недопустимый уровень температуры нагнетания напрямую связан с износом или разрушением клапанов и уплотнений, отклонением от расчётных режимов системы охлаждения отдельных узлов и пр. [6, 7, 9, 12]. Наиболее ответственные элементы существующих поршневых компрессоров функционируют при повышенном механическом, температурном и химическом воздействии, что предполагает возможные нештатных ситуаций с катастрофическими последствиями [6, 7, 9, 11–18]. В связи с этим наработка на отказ и межремонтные сроки для большинства технологических поршневых компрессоров составляют не более 8000 часов, а на практике — существенно меньше (в отдельных случаях — 500...800 часов) [6–9, 11, 12, 19, 20]. Количество узлов и деталей широкой номенклатуры и типоразмеров в поршневом компрессоре может превышать 500 единиц даже без учёта систем диагностики, регулирования, смазки, охлаждения, что неизбежно ведёт к снижению надёжности рассматриваемого технического объекта [6, 7, 11, 19–24].

В связи с этим становится актуальным вариант замены быстроходных поршневых ступеней на тихоходные длинноходовые с линейным приводом (ТДСАП), результаты экспериментальных

и теоретических исследований которых доказывают, что по совокупности ряда показателей они могут иметь неоспоримые преимущества по сравнению с серийно выпускаемыми поршневыми компрессорами [25–27]. Таким образом, целью работы ставится осуществление анализа характеристик технологических водородных компрессоров среднего давления на базе ТДСАП и оценки возможности их рассмотрения в качестве альтернативы серийно выпускаемым малорасходным поршневым компрессорам среднего давления.

Методика расчёта

Объектом исследования являются рабочие процессы водородной поршневой длинноходовой тихоходной компрессорной ступени с интенсивным внешним охлаждением цилиндра, принципиальная схема которой представлена на рис. 1 и соответствует ранее опубликованным вариантам [26, 28]. Применяемая при теоретическом исследовании рассматриваемого объекта методика расчёта представляет собой многократно апробированную и ранее верифицированную обобщённую математическую модель рассматриваемой ступени [26, 28].

В качестве основных допущений приняты следующие:

- газовая среда непрерывна и однородна;
- параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объёму рабочей камеры;
- изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало;
- теплоота 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;
- теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный;

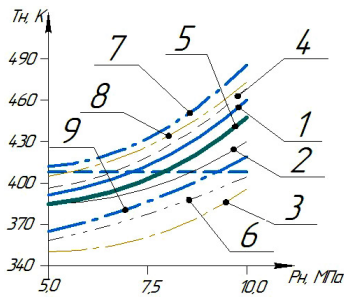


Рис. 2. Влияние давлений нагнетания и всасывания на температуру нагнетания ступени ТДСЛП при различных диаметрах её цилиндра: 7...9 — диаметр цилиндра 0,1 м; 4...6 — диаметр цилиндра 0,05 м; 1...3 — диаметр цилиндра 0,01 м; пунктирная линия — предельно допустимая температура нагнетания; 1, 4, 7 — давление всасывания 0,1 МПа; 2, 5, 8 — давление всасывания 0,5 МПа; 3, 6, 9 — давление всасывания 2,0 МПа

Fig. 2. Effect of discharge and suction pressures on the discharge temperature of the LLA stage for different diameters of its cylinder: 7...9 — cylinder diameter of 0.1 m; 4...6 — cylinder diameter of 0.05 m; 1...3 — cylinder diameter of 0.01 m; dotted line — maximum permissible discharge temperature; 1, 4, 7 — suction pressure of 0.1 MPa; 2, 5, 8 — suction pressure of 0.5 MPa; 3, 6, 9 — suction pressure of 2.0 MPa

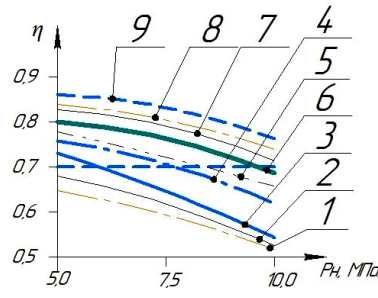


Рис. 3. Влияние давлений нагнетания и всасывания на индикаторный КПД ступени ТДСЛП при различных диаметрах её цилиндра: 7...9 — диаметр цилиндра 0,1 м; 4...6 — диаметр цилиндра 0,05 м; 1...3 — диаметр цилиндра 0,01 м; пунктирная линия — предельно допустимая температура нагнетания; 1, 4, 7 — давление всасывания 0,1 МПа; 2, 5, 8 — давление всасывания 0,5 МПа; 3, 6, 9 — давление всасывания 2,0 МПа

Fig. 3. Effect of discharge and suction pressures on the indicated efficiency of the LLA stage for different cylinder diameters: 7...9 — cylinder diameter of 0.1 m; 4...6 — cylinder diameter of 0.05 m; 1...3 — cylinder diameter of 0.01 m; dotted line — maximum permissible discharge temperature; 1, 4, 7 — suction pressure of 0.1 MPa; 2, 5, 8 — suction pressure of 0.5 MPa; 3, 6, 9 — suction pressure of 2.0 MPa

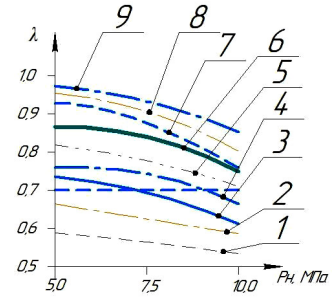


Рис. 4. Влияние давлений нагнетания и всасывания на коэффициент подачи ступени ТДСЛП при различных диаметрах её цилиндра: 7...9 — диаметр цилиндра 0,1 м; 4...6 — диаметр цилиндра 0,05 м; 1...3 — диаметр цилиндра 0,01 м; пунктирная линия — предельно допустимая температура нагнетания; 1, 4, 7 — давление всасывания 0,1 МПа; 2, 5, 8 — давление всасывания 0,5 МПа; 3, 6, 9 — давление всасывания 2,0 МПа

Fig. 4. Effect of discharge and suction pressures on the delivery coefficient of the LLA stage for different diameters of its cylinder: 7...9 — cylinder diameter of 0.1 m; 4...6 — cylinder diameter of 0.05 m; 1...3 — cylinder diameter of 0.01 m; dotted line — maximum permissible discharge temperature; 1, 4, 7 — suction pressure of 0.1 MPa; 2, 5, 8 — suction pressure of 0.5 MPa; 3, 6, 9 — suction pressure of 2.0 MPa

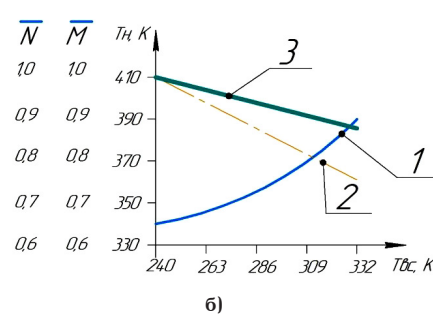
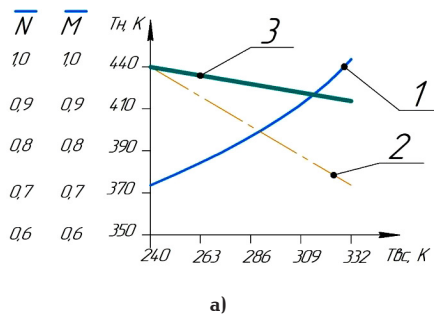


Рис. 5. Влияние температуры всасывания на интегральные характеристики ступени ТДСЛП при диаметре цилиндра 0,05 м и соотношениях давлений нагнетания и всасывания 7,5 МПа — 0,1 МПа (а) и 5,0 МПа — 1,0 МПа (б): 1 — температура нагнетания; 2 — относительное изменение индикаторной мощности; 3 — относительное изменение массовой производительности (подачи)

Fig. 5. Effect of suction temperature on integral features of the LLA stage with a cylinder diameter of 0.05 m and ratios of discharge and suction pressures of 7.5 MPa — 0.1 MPa (a) and 5.0 MPa — 1.0 MPa (b): 1 — discharge temperature; 2 — relative change in indicated power; 3 — relative change in mass productivity (feed)

и давлении нагнетания 5,0 МПа при сжатии в одной ступени с интенсивным внешним охлаждением безопасный уровень температуры нагнетания обеспечивается в широком диапазоне диаметров цилиндра (на рис. 2 показан пунктирной линией). При этом обеспечивается достаточно высокая энергоэффективность рабочего процесса (рис. 3) и коэффициент подачи рассматриваемой ступени (рис. 4).

При более жёстких режимах работы, например, при давлении всасывания 0,1 МПа и давлении нагнетания 7,5 МПа, безопасный уровень температуры нагнетания может быть обеспечен в ограниченном диапазоне малых диаметров цилиндра (менее 0,05 м).

Как показано на рис. 5, изменение температуры в стандартной точке всасывания рассматриваемой ступени при её фиксированных конструктивных размерах существенно влияет как на её температурный режим, так и на её производительность и энергетическую эффективность.

При анализе влияния температуры всасывания на рабочий процесс ступени водородного ТДСЛП нельзя не отметить особенности этого рабочего процесса (рис. 6). Как видно из представленных температурных диаграмм, интенсивное внешнее охлаждение ступени ТДСЛП позволяет в ряде случаев снижать температуру газа в полости цилиндра так, что к началу процесса сжатия она становится

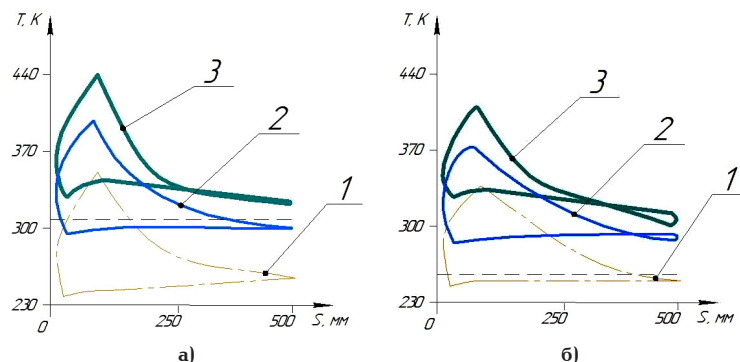


Рис. 6. Температурные диаграммы дожимной ступени ТДСАП при диаметре цилиндра ступени ТДСАП 0,05 м, давлении всасывания 1,0 МПа, давлении нагнетания 5,0 МПа, температуре охлаждающей среды 313 К (а) и 263 К (б): 1 — температура всасывания 240 К; 2 — температура всасывания 293 К; 3 — температура всасывания 333 К

Fig. 6. Temperature diagrams of the LLLA booster stage with a LLLA stage cylinder diameter of 0.05 m, suction pressure of 1.0 MPa, discharge pressure of 5.0 MPa, coolant temperature of 313 K (a) and 263 K (b): 1 — suction temperature of 240 K; 2 — suction temperature of 293 K; 3 — suction temperature of 333 K

на 10...20 К ниже, чем в стандартной точке всасывания.

Выводы и заключение

Представленные в статье прогнозные результаты оценки применимости технологических водородных компрессоров среднего давления показали их высокую эффективность в части обеспечения безопасных температурных режимов в широком диапазоне рабочих давлений всасывания и нагнетания. Следует отметить выявленные уникальные особенности рабочих процессов водородной ступени ТДСАП, связанных с возможностью охлаждения рабочего газа в полости цилиндра в процессе всасывания. В известной степени выявленная специфика работы ТДСАП с учётом реальных условий эксплуатации позволяет рассматривать её как один из возможных факторов регулирования производительности компрессорной ступени.

С учётом существующих проблем по обеспечению требуемого температурного режима применительно к быстроходным поршневым компрессорам разработка и внедрение перспективных компрессорных технологий представляются особенно актуальными.

Список источников / References

- ГОСТ Р 53737–2009 (ИСО 13707:2000) Нефтяная и газовая промышленность. Поршневые компрессоры: Общие технические требования. Введ. 2011–01–01. Москва: Стандартинформ, 2012. 156 с.
- GOST R 53737–2009 (ISO 13707:2000) Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Porshnevyye kompressory: Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Reciprocating compressors. General technical requirements]. Moscow, 2012. 156 p. (In Russ.).
- Общие технические условия по ремонту поршневых компрессоров (Утв. М-вом нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти СССР 06.03.1985). Волгоград: Миннефтехиммаш СССР, 1985. 363 с.
- Obshchiye tekhnicheskiye usloviya po remontu porshnevyykh kompressorov [General technical requirements for the repair of piston compressors]. Volgograd, 1985. 363 p. (In Russ.).
- Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехими-

ческих и нефтеперерабатывающих производств»: приказ от 15.12.2020 г. № 533 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Доступ из справочно-правовой системы «Гарант».

Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Obshchiye pravila vzryvobezopasnosti dlya vzryvopozharoопасnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv»: prikaz ot 15.12.2020 g. № 533 Federal'noy sluzhby po ekologicheskemu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru [On approval of federal norms and rules in the sphere of industrial safety "General rules of explosion safety for explosion- and fire-hazardous chemical, petrochemical and oil refining production": Order No. 533 of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 15.12.2020.]. Available at Garant. (In Russ.).

4. ГОСТ Р 54802–2011 (ИСО 13631:2002). Нефтяная и газовая промышленность. Компрессоры поршневые газовые агрегатированные. Технические требования. Введ. 01–06–2013. Москва: Стандартинформ, 2014. 92 с.

GOST P 54802–2011 (ISO 13631:2002). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Kompressory porshnevyye gazovyye agregirovannyye. Tekhnicheskiye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Packaged reciprocating gas compressors. Technical requirements]. Moscow, 2014. 92 p. (In Russ.).

5. РД 39-0148139-0001-2000. Система технического обслуживания и ремонта компрессорных станций на базе технической диагностики. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082157> (дата обращения: 06.03.2025).

RD 39-0148139-0001-2000. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kompressornykh stantsiy na baze tekhnicheskoy diagnostiki [System of maintenance and repair of compressor stations based on technical diagnostics]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082157> (accessed: 06.03.2025). (In Russ.).

6. Видякин Ю. А., Добровольский Е. Б., Кондратьева Т. Ф. Оппозитные компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1979. 279 с. ISBN 5-1387878-A.

Vidyakin Yu. A., Dobrovolskiy E. B., Kondrat'yeva T. F. Oppozitnyye kompressory [Opposite compressors]. Leningrad, 1979. 279 p. ISBN 5-1387878-A. (In Russ.).

7. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования. Конструкции. Москва: КолосС, 2008. 711 с.

Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 2. Osnovy proyektirovaniya. Konstruktsii [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 2. Design principles. Structures]. Moscow, 2008. 711 p. (In Russ.).

8. Байков И. Р., Китаев С. В., Файрушин Ш. З. Диагностика технического состояния поршневых компрессоров // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3 (63). С. 28–30. EDN: TWVZWF.
- Baykov I. R., Kitayev S. V., Fayrushin Sh. Z. Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevykh kompressorov [Diagnostics of reciprocating compressors' technical conditions]. *Energobezopasnost' i energosberezheniye. Energy Security and Energy Saving*. 2015. No. 3 (63). P. 28–30. EDN: TWVZWF. (In Russ.).
9. Фуладиванда М., Хейдари М. А. Исследование влияния хлорид-ионов на подпиточные водородные компрессоры = Fouladivanda M., Heidary M. A. A study into the impact of chloride ions on the make-up hydrogen compressors / пер. с англ. М. А. Федоровой // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 75–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-75-84. EDN: BNLVJQ.
- Fouladivanda M., Heidary M. A. A study into the impact of chloride ions on the make-up hydrogen compressors / trans. from Engl. M. A. Fedorova. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 75–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-75-84. EDN: BNLVJQ. (In Russ.).
10. Круг А. А. Обеспечение экономической безопасности на основе государственной политики импортозамещения: автореф. дис. ... канд. эконом. наук. Мытищи, 2022. 28 с.
- Krut' A. A. Obespecheniye ekonomicheskoy bezopasnosti na osnove gosudarstvennoy politiki importozameshcheniya [Ensuring economic security based on the state import substitution policy]. *Mytishchi*, 2022. 28 p. (In Russ.).
11. Юша В. Л., Сутягинский М. А., Громов А. Ю., Ушаков П. В., Потапов Ю. А. О взаимосвязи цифровых платформ крупных химических и нефтеперерабатывающих производств с техническим обликом парка компрессорного оборудования // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-25-32. EDN: GNSNQW.
- Yusha V. L., Sutyaginskiy M. A., Gromov A. Yu., Ushakov P. V., Potapov Yu. A. O vzaimosvyazi tsifrovyykh platform krupnykh khimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv s tekhnicheskim oblikom parka kompressorogo oborudovaniya [On the relationship of digital technological platforms of large chemical and oil refining industries with the technical appearance of the compressor equipment fleet]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-25-32. EDN: GNSNQW. (In Russ.).
12. Захаренко А. В., Захаренко В. П. О расчёте нагрузок в многокольцевом поршневом уплотнении компрессоров без смазки высокого давления // Вестник Международной академии холода. 2012. № 2. С. 29–32. EDN: PBSKNR.
- Zakharenko A. V., Zakharenko V. P. O raschete nagruzok v mnogokol'tsevom porshnevom uplotnenii kompressorov bez smazki vysokogo davleniya [Calculating loads for a multi-ring piston seal in high-pressure oil-free compressors]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2012. No. 2. P. 29–32. EDN: PBSKNR. (In Russ.).
13. Кравченко Д. Д., Чижевская Е. Л., Медведев А. В., Зemenkov Ю. Д. Интеллектуальный мониторинг состояния оборудования компрессорных станций для предупреждения отказов и аварий // Тюменский научный журнал. 2025. № 1 (5). С. 18–24. DOI: 10.24412/3034-154X-2025-1-18-24. EDN: KMIUVT.
- Kravchenko D. D., Chizhevskaya E. L., Medvedev A. V., Zemenkov Yu. D. Intellektual'nyy monitoring sostoyaniya oborudovaniya kompressornykh stantsiy dlya preduprezhdeniya otkazov i avariyy [Intelligent monitoring of compressorstation equipment status to prevent failures and accidents]. *Tyumenskiy nauchnyy zhurnal. Tyumen Scientific Journal*. 2025. No. 1 (5). P. 18–24. DOI: 10.24412/3034-154X-2025-1-18-24. EDN: KMIUVT. (In Russ.).
14. Хатамова Д. Н., Джураев Р. У. Исследование влияния температуры всасываемого воздуха на эффективность поршневого компрессора // Universum: технические науки. 2021. № 6-2 (87). С. 44–47. DOI: 10.32743/UniTech.2021.87.6.12008. EDN: ESGTMO.
- Khatamova D. N., Dzhurayev R. U. Issledovaniye vliyaniya temperatury vsasyvayemogo vozdukha na effektivnost' porshneвого kompressora [Investigation of the influence of the intake air temperature on the efficiency of a reciprocating compressor]. *Universum: tekhnicheskoye nauki. University: Technical Sciences*. 2021. No. 6-2 (87). P. 44–47. DOI: 10.32743/UniTech.2021.87.6.12008. EDN: ESGTMO. (In Russ.).
15. Липкович И. Э., Пикалов А. В., Орищенко И. В. Основы безопасности при эксплуатации компрессорных установок на АТП // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2015. № 2. С. 33–40. EDN: TJGLPT.
- Lipkovich I. E., Pikalov A. V., Orishchenko I. V. Osnovy bezopasnosti pri ekspluatatsii kompressornykh ustanovok na ATP [Fundamentals of safety during operation of compressor units at the transport company]. *Gruzovoye i Passazhirskoye Avtokhozyaystvo*. 2015. No. 2. P. 33–40. EDN: TJGLPT. (In Russ.).
16. Шайбаков Р. А., Абдрахманов Н. Х., Кузеев И. Р., Симарчук А. С., Рахимов Ф. Р. Расследование аварийных ситуаций: новые методы и подходы // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2008. Вып. 3 (73). С. 110–121. EDN: JVUZZT.
- Shaybakov R. A., Abdrakhmanov N. Kh., Kuzeyev I. R., Simarchuk A. S., Rakhimov F. R. Rassledovaniye avariynykh situatsiy: novyye metody i podkhody [Investigations of emergency situations: new methods and approaches]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2008. Issue. 3 (73). P. 110–121. EDN: JVUZZT. (In Russ.).
17. Файрушин Ш. З., Байков И. Р., Китаев С. В. Определение показателей надежности поршневых компрессоров // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 2. С. 120–124. EDN: WWOZTL.
- Fayrushin Sh. Z., Baykov I. R., Kitayev S. V. Opredeleniye pokazateley nadezhnosti porshnevykh kompressorov [Determining reliability indices of piston compressors]. *Neftegazovoye delo. Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 14, no. 2. P. 120–124. EDN: WWOZTL. (In Russ.).
18. Байков И. Р., Китаев С. В., Файрушин Ш. З. Диагностика технического состояния поршневых компрессоров // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3. С. 28–30. EDN: TWVZWF.
- Baykov I. R., Kitayev S. V., Fayrushin Sh. Z. Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevykh kompressorov [Diagnostics of reciprocating compressors' technical conditions]. *Energobezopasnost' i energosberezheniye. Energy Security and Safety Energy*. 2015. No. 3. P. 28–30. EDN: TWVZWF. (In Russ.).
19. Бусаров С. С., Беликов А. В., Капелюховский А. А., Капелюховская А. А. Анализ конкурентоспособности водородсодержащих циркуляционных компрессоров на базе тихоходных длинноходовых ступеней // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 1. С. 499–503. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-499-503. EDN: ZJNNPK.
- Busarov S. S., Belikov A. V., Kapelyukhovskiy A. A., Kapelyukhovskaya A. A. Analiz konkurentosposobnosti vodorodsoderzhashchikh tsirkulyatsionnykh kompressorov na baze tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Analysis of the competitiveness of hydrogen-containing circulation compressors based on low-speed long-stroke stages]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskoye nauki. Izvestiya*

Tula State University. Technical Sciences. 2023. No. 1. P. 499–503. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-499-503. EDN: ZJNNPK. (In Russ.).

20. Модернизация компрессора 4M16M-45-35/55. URL: <https://chemtech.ru/modernizaciya-kompressora-4m16m-45-35-55/> (дата обращения: 06.03.2025).

Modernizatsiya kompressora 4M16M-45-35/55 [Renovation of the 4M16M-45-35/55 compressor]. URL: <https://chemtech.ru/modernizaciya-kompressora-4m16m-45-35-55/> (accessed: 06.03.2025). (In Russ.).

21. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Введ. 01–01–1997. Москва: Изд-во стандартов, 1995. 12 с.

GOST 27.301–95. Nadezhnost' v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnyye polozheniya [Dependability in technics. Dependability prediction. Basic principles]. Moscow, 1995. 12 p. (In Russ.).

22. ГОСТ 27.002–2015. Надёжность в технике. Термины и определения. Введ. 01–03–2017. Москва: Стандартиформ, 2016. 30 с.

GOST 27.002–2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Dependability in technics. Terms and definitions]. Moscow, 2016. 30 p. (In Russ.).

23. Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. Москва: Машиностроение, 1986. 224 с.

Khazov B. F., Didusev B. A. Spravochnik po raschetu nadezhnosti mashin na stadii proyektirovaniya [Handbook on the reliability calculating of machines at the design stage]. Moscow, 1986. 224 p. (In Russ.).

24. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с. ISBN 5-7038-1996-2.

Pronikov A. S. Parametricheskaya nadezhnost' mashin [Parametric reliability of machines]. Moscow, 2002. 560 p. ISBN 5-7038-1996-2. (In Russ.).

25. Юша В. Л. Научно-технологические предпосылки совершенствования и промышленного освоения малорасходных компрессорных агрегатов на базе длинноходовых поршневых ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39. EDN: YVEINB.

Yusha V. L. Nauchno-tekhnologicheskiye predposylki sovershenstvovaniya i promyshlennogo osvoyeniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov na baze dlinnokhodovykh porshnevykh stupeney [Scientific and technological prerequisites for improvement and industrial development of low-flow compressor units based on long-stroke piston stages]. Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39. EDN: YVEINB. (In Russ.).

26. Бусаров С. С. Создание и совершенствование бесшмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2023. 325 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012860386/ (дата обращения: 15.03.2025).

Busarov S. S. Sozdaniye i sovershenstvovaniye bessmazozhnykh porshnevykh kompressorov srednego i vysokogo davleniya na baze maloraskhodnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Creation and improvement of grease-free reciprocating compressors of medium and high pressure on the basis of low-speed long-stroke stages]. Omsk, 2023. 325 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012860386/ (accessed: 15.03.2025). (In Russ.).

27. 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. DOI: 10.18721/JEST.24408. EDN: YRNOVN.

Busarov S. S., Yusha V. L. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Prospects for creating low-flow compressor units with medium and high pressures based on unified low-speed long-stroke stages]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408. EDN: YRNOVN. (In Russ.).

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

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

СУТЯГИНСКИЙ Михаил Александрович, председатель совета директоров АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

ПОТАПОВ Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный специалист департамента по развитию и новым технологиям АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

ГРОМОВ Антон Юрьевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по гражданской продукции АО «Научно-технический комплекс «Криогенная техника», г. Омск.

Адрес для переписки: azot111@bk.ru

УШАКОВ Петр Валерьевич, первый заместитель генерального директора АО «Научно-технический комплекс «Криогенная техника», г. Омск.

БУСАРОВ Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Адрес для переписки: ssi1980@mail.ru

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), главный специалист технического отдела ОАО «Сибнефтьтранспроект», г. Омск.

SPIN-код: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Адрес для переписки: 1978yusha@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 22.04.2025; одобрена после рецензирования 27.07.2025; принята к публикации 13.08.2025.

SUTYAGINSKIY Mikhail Alexandrovich, Chairman of the Board of Directors, JSC "Group of companies "Titan", Omsk.

POTAPOV Yuri Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of the Development and New Technologies Department, JSC "Group of companies "Titan", Omsk.

GROMOV Anton Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director for Civilian Products, JSC "Scientific and Technical Complex "Cryogenic Technique", Omsk.

Correspondence address: azot111@bk.ru

USHAKOV Petr Valeryevich, First Deputy General Director, JSC "Scientific and Technical Complex "Cryogenic Technique", Omsk.

BUSAROV Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Correspondence address: bssi1980@mail.ru

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Specialist of the Technical Department, OJSC "Sibneftetransproekt", Omsk.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: 1978yusha@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 22.04.2025; approved after reviewing 27.07.2025; accepted for publication 13.08.2025.