

АНАЛИЗ ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТИ КЛАПАНОВ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ И ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИИ

М. Л. Хазин¹, С. А. Волегов¹, О. В. Сокина¹

¹ Уральский государственный горный университет (УГГУ),
Екатеринбург, Россия, e-mail: Khasin@ursmu.ru

Аннотация: Сжатый воздух используется в горной промышленности при буровых работах, вентиляции, обработке сырья и других работах, что вызвано более высокой безопасностью пневматического оборудования. Это актуально для взрыво- и пожароопасных производств, где использование электрооборудования нежелательно. В связи с этим необходимо применять надежные машины, использующие пневматическую энергию. тепловой режим, производительность и удельный расход электроэнергии поршневых компрессоров определяют в основном клапаны. Клапаны компрессоров должны функционировать надежно, несмотря на большую частоту срабатывания, высокую температуру и возможное загрязнение газа инородными частицами. В случае отказа клапана компрессор теряет свою работоспособность. нагрузки, действующие на пластину при работе компрессора (изгиб в закрытом состоянии, удар в момент встречи с седлом или ограничителем), приводят к отказу клапана. На долговечность клапанов также влияют структура и свойства материала, из которого изготовлены детали клапана. Из практики использования клапанов с консольно закрепленной пластиной видно, что они имеют ряд важных недостатков, вызванных по большей части конструкцией клапана. в процессе работы компрессора такая схема установки пластины в клапане подвергается циклическим нагрузкам, что приводит к возникновению усталостных трещин, являющихся основной причиной поломок. Указанные недостатки были устранены в конструкциях клапанов, разработанных в Уральском государственном горном университете. клапаны предложенной конструкции отличаются отсутствием крепления пластин с пружинами к седлу клапана, что уменьшило величину ударных нагрузок и повысило срок службы клапана в 2–3 раза. Такое решение позволило исключить воздействие изгибающего момента на пластину в процессе работы компрессора, что позволило применить пружинно-рессорную сталь (65Г или 55С2) или высокоуглеродистую сталь после закалки и среднего отпуска вместо более дорогих импортных сталей.

Ключевые слова: горнодобывающая промышленность, импортозамещение, клапан, конструкция, пластина, надежность, работоспособность, поршневой компрессор.

Для цитирования: Хазин М. Л., Волегов С. А., Сокина О. В. Анализ причин неисправности клапанов поршневых компрессоров и пути улучшения их конструкции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 21–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_21.

Analysis of the causes of piston valves failures compressors and ways of improvement their designs

M. L. Khazin¹, S. A. Volegov¹, O. V. Sokerina¹

¹ Ural State Mining University (USGU), Yekaterinburg, Russia

Abstract: Compressed air is used in the mining industry for drilling, ventilation, processing of raw materials and other work, which is caused by the higher safety of pneumatic equipment. This is relevant for explosive and fire hazardous industries, where the use of electrical equipment is undesirable. In this regard, it is necessary to use reliable machines that use pneumatic energy. The thermal regime, productivity and specific power consumption of reciprocating compressors are determined mainly by valves. Compressor valves must function reliably despite the high frequency of operation, high temperatures and possible contamination of the gas by foreign particles. If the valve fails, the compressor loses its functionality. Loads acting on the plate during compressor operation (bending in the closed state, impact at the moment of contact with the seat or limiter) lead to valve failure. The durability of valves is also affected by the structure and properties of the material from which the valve parts are made. From the practice of using valves with a cantilevered plate, it can be seen that they have a number of important drawbacks, mainly caused by the design of the valve. During the operation of the compressor, this arrangement of the plate in the valve is subjected to cyclic loads, which leads to the appearance of fatigue cracks, which are the main cause of breakdowns. These shortcomings were eliminated in the valve designs developed at the Ural State Mining University. The valves of the proposed design are distinguished by the absence of attachment of plates with springs to the valve seat, which reduced the magnitude of shock loads and increased the service life of the valve by 2–3 times. This decision made it possible to exclude the effect of a bending moment on the plate during the operation of the compressor, which made it possible to use spring-spring steel (65G or 55S2) or high-carbon steel after hardening and medium tempering instead of more expensive imported steels.

Key words: mining industry, import substitution, valve, design, plate, reliability, operability, piston compressor.

For citation: Khazin M. L., Volegov S. A., Sokerina O. V. Analysis of the causes of piston valves failures compressors and ways of improvement their designs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):21–33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_21.

Введение

Компрессоры сжимают воздух до давления в 1 МПа, а в некоторых случаях до давления более 40 МПа. Универсальность поршневых компрессоров при работе в широком диапазоне производительности и создании высоких давлений независимо от плотности газа обеспечивает их широкое применение в промышленности. Поршневые компрессоры широко используются при добыче полезных ископаемых, получении СПГ, в металлургии и др. Ожи-

дается, что поршневые компрессоры станут еще более востребованы в ближайшем будущем, поскольку к ископаемому топливу постепенно добавляется водород [1–3].

Одной из движущих сил быстрой индустриализации стран с развивающейся экономикой является спрос на воздушные компрессоры во всем мире. Заметный рост наблюдался в Индии и Латинской Америке, а в Юго-Восточной Азии спрос вырос незначи-

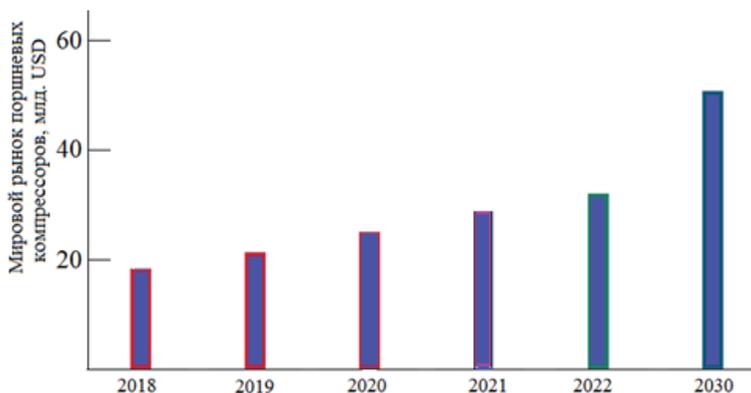


Рис. 1. Мировой рынок поршневых компрессоров (источник: база данных MRFR и аналитический обзор)

Fig. 1. Global market for reciprocating compressors (source: MRFR database and policy brief)

тельно¹. Ожидается, что к 2030 году объем мирового рынка поршневых компрессоров значительно возрастет (рис. 1), увеличиваясь в среднем на 6,5% в год за период с 2021 по 2030 год. Основным фактором роста этого рынка является растущий спрос на энергию и быстрая индустриализация на развивающихся рынках, таких как Индия и Китай [4–6].

Компрессоры, используемые в горнодобывающей промышленности, работают в тяжелых условиях и при этом должны быть надежным и безопасным оборудованием. Сжатый воздух используется при буровых работах (бурение, проходка туннелей), вентиляции, обработке сырья и других работах, что вызвано более высокой безопасностью пневматического оборудования. Это актуально для взрыво- и пожароопасных производств, где использование электрооборудования нежелательно. В связи с этим необходимо применять надежные машины, использующие пневматическую энергию.

Несмотря на то, что сегодня на рынке предлагаются разнообразные

виды пневматических машин, поршневые компрессоры не сходят со сцены, поскольку для них характерна, в отличие от других типов компрессоров, простота конструкции, обслуживания и ремонта, высокая надежность и КПД. Например, в России и странах ЕАЭС самыми востребованными компрессорами производительностью до 100 м³/мин являются поршневые [7, 8], составляющие почти 80% всего парка компрессоров [9, 10]. Из результатов исследования, проведенного Европейским форумом поршневых компрессоров (EFRC) в 2019 г., следует, что основная доля поршневых и винтовых компрессоров имеет надежность в диапазоне 90–97% (рис. 2).

Цель работы. Анализ причин неисправности клапанов поршневых компрессоров, применяемых в горнодобывающей промышленности России, и пути улучшения их конструкций.

Методика проведения исследований. Анализ причин отказов клапанов поршневых компрессоров.

Теория вопроса

Клапаны поршневых компрессоров предназначены для сообщения или разъединения полости цилиндра

¹ Источник: https://www.c-o-k.ru/market_news/mirovoy-rynok-kompressorov-v-2022-godu

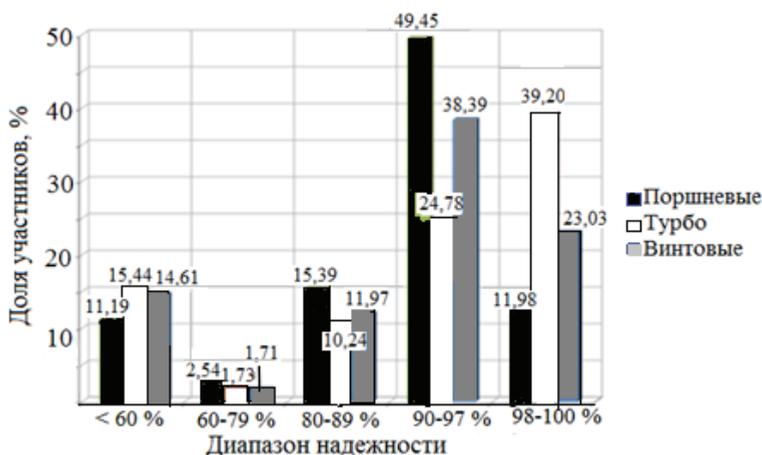


Рис. 2. Экспертная оценка надежности компрессоров (по данным EFRC 2019)

Fig. 2. General opinion about the reliability of compressors from the EFRC 2019 study (result of EFRC's 2009 compressor reliability survey)

с полостями нагнетания и всасывания. Также клапаны определяют в основном производительность, тепловой режим и удельный расход электроэнергии. В современных компрессорах обычно используются клапаны, закон движения запорного органа которых определяется изменяющимся перепадом давления, т.е. самодействующие.

Клапаны компрессоров должны функционировать надежно, несмотря на большую частоту срабатывания, высокую температуру и возможное загрязнение газа инородными частицами. В случае отказа клапана компрессор теряет свою работоспособность. Нагрузки, действующие на пластину при работе компрессора (изгиб в закрытом состоянии, удар в момент встречи с седлом или ограничителем), приводят к отказу клапана. На долговечность клапанов также влияют структура и свойства материала, из которого изготовлены детали клапана.

Поскольку клапаны являются основными компонентами поршневых компрессоров, их функциональная целостность определяет эффективность

и надежность машины. Практически все статистические данные производителей и пользователей ставят клапаны на первое место среди неисправных узлов поршневых компрессоров. Мониторинг, проведенный компанией Dresser-Rand [6, 11], подтвердил, что отказ клапана компрессора является основной причиной внеплановых остановов компрессоров, приводящих к дорогостоящим простоям (рис. 3). Среди наиболее частых причин отказа клапана были высокие скорости удара, износ и условия эксплуатации. Отмечается, что отказы клапана составляют примерно 60% от общего числа отказов компрессора по другим причинам [11–13].

Неисправность клапана компрессора может быть результатом механических факторов; некоторые из них могут возникать внутри без ведома оператора, а другие — из-за небрежности пользователя. Если клапан подвергается чрезмерным нагрузкам из-за перегрузки или перегрева системы, клапан может легко изнашиваться и терять способность функционировать должным

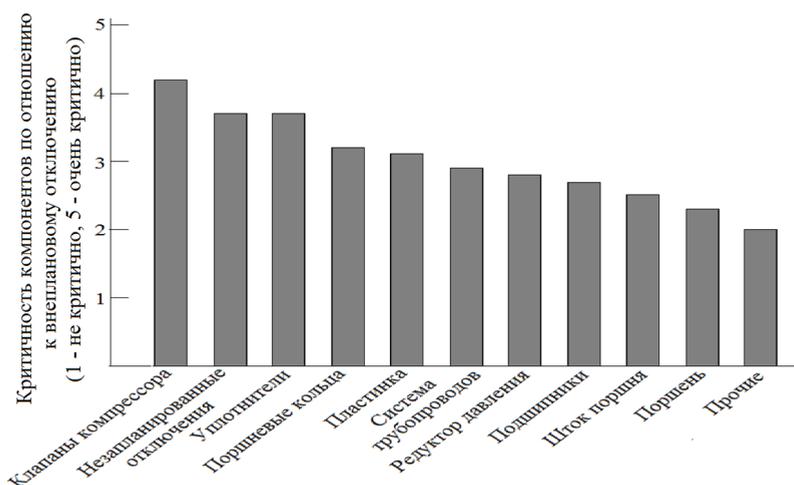


Рис. 3. Компоненты, вызывающие внеплановые остановки поршневых компрессорных систем (по данным EFRC 2019)

Fig. 3. Criticality of reciprocating compressor components with respect to unscheduled shutdowns (result of EFRC's 2009 compressor reliability survey)

образом. Если воздушный компрессор используется с нарушением рекомендаций производителя, то это тоже может привести к выходу клапана из строя. Одними из наиболее распространенных механических причин отказа клапана являются следующие факторы.

1. При работе воздушного компрессора с высокой частотой в течение длительных периодов времени нагрузка может сказаться на различных компонентах системы, включая клапаны. Если постоянно использовать воздушный компрессор с настройками выше средних, то следует следить за состоянием клапанов. При длительной работе воздушного компрессора с высокой частотой следует проверять клапаны чаще.

2. Если воздушный компрессор эксплуатируется с нарушением рекомендаций изготовителя, то возникающие проблемы с производительностью могут быть результатом неисправности клапана.

3. Если в клапане пружина закреплена, узел может не работать долж-

ным образом, и пружина теряет запас упругости из-за накопления напряжений и пластической деформации. Пружины спроектированы с определенной степенью гибкости. Если пружина клапана слишком мягкая или жесткая для выполнения своей предполагаемой функции, она теряет способность управлять соответствующими компонентами.

4. Нарушение подачи воздуха может привести к повреждению клапанов в результате аэродинамического удара. Поршневой воздушный компрессор предназначен для нагнетания воздуха с заданной скоростью, и система рассчитана на определенный уровень стабильной производительности. Когда система внезапно начинает работать нестабильно, это приводит к повреждению клапанов.

В настоящее время в поршневых компрессорах используется большое количество различных типов самодействующих клапанов. Для низкого и среднего давления широко применяются пластинчатые клапаны: коль-

цевые, дисковые, ленточные, лепестковые, прямоточные. В поршневых компрессорах используются несколько типов клапанов: кольцевые, тарельчатые, полосовые швеллерные и грибовидные (рис. 4) [14].

Обсуждение результатов

На компрессорных станциях России широко распространены поршневые машины с прямоточными клапанами типа ПИК и кольцевыми. Из практики

и данных испытаний поршневых компрессоров следует, что каждый тип клапанов имеет свои преимущества и недостатки. С увеличением числа оборотов вала компрессора увеличиваются динамические нагрузки на пластины [15], что увеличивает вероятность их разрушения.

Кроме того, при ударе об ограничитель пластина отскакивает и в течение некоторого времени совершает колебательные движения между седлом

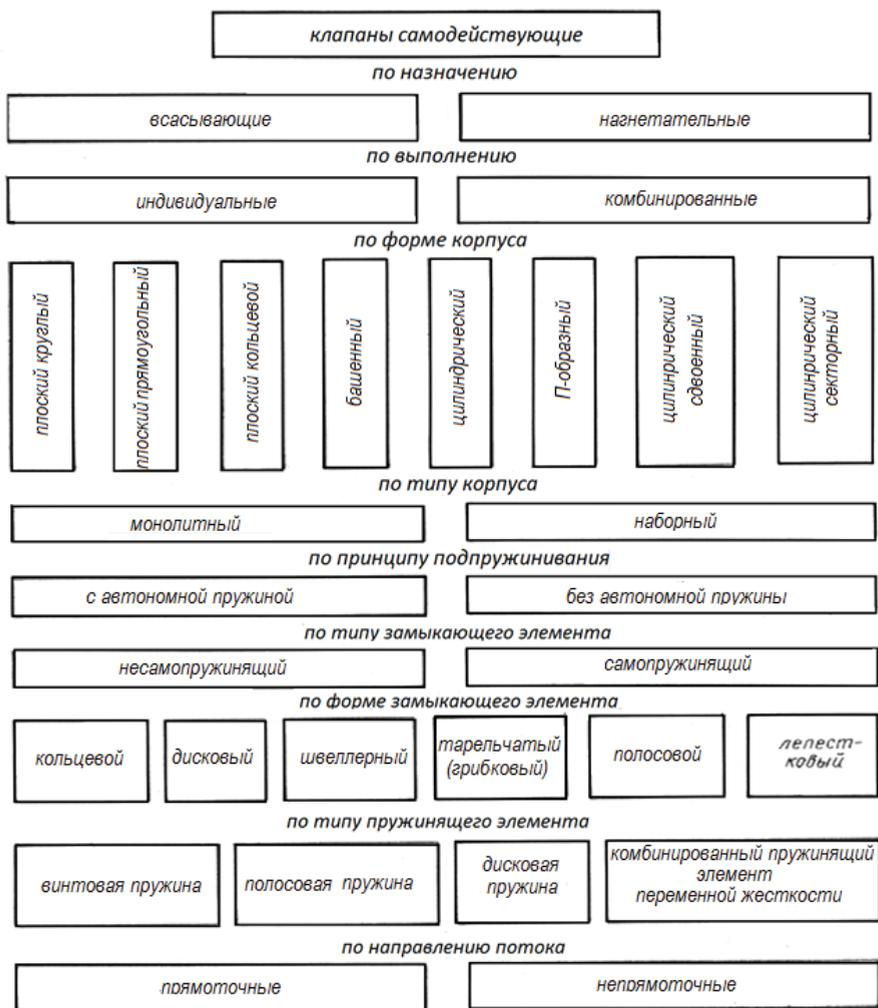


Рис. 4. Классификация самодействующих клапанов [14]

Fig. 4. Classification of self-acting valves [14]

и ограничителем, препятствуя прохождению газа через клапан. В связи с этим разработка различных амортизационных устройств стала основным направлением совершенствования кольцевых клапанов, хотя это усложняет и удорожает конструкцию.

К достоинствам кольцевых клапанов следует отнести простоту конструкции и хорошую герметичность в статическом положении. При этом они обладают рядом существенных недостатков:

- значительная масса подвижных частей (кольца, пружины) приводит к повышению индикаторной работы компрессора, к запаздыванию открытия и закрытия клапана, что снижает коэффициент запаса и повышает удельный расход электроэнергии;

- малая наработка на отказ (изгиб колец, поломка пружин, износ уплотнительных кромок седла и т.д.);

- существенный объем вредного пространства;

- клапан имеет низкий коэффициент использования живого сечения, а также большой коэффициент аэродинамического сопротивления, что связано с его конструкцией.

Попытки изготовления клапанных колец в мастерских шахт и рудников показали свою несостоятельность, поскольку они уступали кольцам заводского изготовления по качеству, что в итоге снижало технико-экономические показатели компрессоров.

Имеющиеся недостатки кольцевых клапанов вызвали необходимость их замены на более удачные конструкции — дисковые и прямоточные. За рубежом с начала 20 века получили широкое распространение дисковые клапаны австрийской фирмы Hoerbiger Ventilwerke GmbH. В России эти клапаны имеют ограниченное применение из-за высокой цены (≈ 1000 €) и низкой ремонтпригодности.

Помимо кольцевых и тарельчатых клапанов в России нашли широкое применение разработки института «ЛЕННИИХИММАШ» [16]. Эти клапаны используют в воздушных компрессорах общего назначения, а также в первых ступенях компрессоров среднего и высокого давления с максимальным перепадом давления в клапане 4 МПа, снижая потребляемую мощность привода компрессора на 8–12% и повышая производительность на 6–10%.

В то же время практика эксплуатации клапанов ПИК показала, что они обладают рядом существенных недостатков, в основном обусловленных конструкцией самого клапана. Замыкающий орган — пластина — установлен консольно и под действием циклических нагрузок разрушается вследствие образования усталостных трещин. В результате компрессор снижает свои технико-экономические показатели, что повышает себестоимость сжатого воздуха [17, 18].

Согласно исследованиям [19, 20], от 50 до 90% простоев компрессоров связано с повреждением клапанов (преимущественно пластин). Поэтому особое внимание необходимо уделить созданию надежной конструкции клапана. Так как пластины клапанов подвержены циклическим нагрузкам, для их изготовления используются высококачественные стали из Финляндии и Швеции, что значительно увеличивает их стоимость.

Конструкция клапанов существенно влияет на надежность работы компрессора. Выбор клапана разработчиком компрессора во многом зависит от характеристик и параметров технологического процесса, что предполагает компромиссы. Возможно, данная конструкция имеет более высокую эффективность, но нуждается в большем обслуживании, и произво-

дитель считает, что если этого не требует рынок, то у него нет стимула ее менять. Соответственно, он продолжает поставлять клапаны, которые не представляют собой наилучшую конструкцию из существующих. Низкая долговечность клапанов ПИК, сложность контроля состояния органов распределения рабочего воздуха и низкая ремонтпригодность вызвали необходимость разработки новых, более удачных конструкций.

Для повышения надежности клапанов следует, по возможности, исключить факторы, приводящие к разрушению пластин и уплотнительных кромок клапанов. Предлагаются различные решения: дополнительная термообработка пластин [21, 22], применение нейронных сетей [4, 11], регулировка давления всасывающего клапана открытия [23, 24], применение метода анализа «Компрессор — сеть» [25] и другие. Оптимальным вариантом является изменение конструкции клапана, позволяющее устранить основные причины его отказа. Поэтому созданию надежной конструкции клапанов необходимо уделять особое внимание [26, 27].

Указанные недостатки были устранены в конструкциях клапанов, разрабатываемых в УГГУ (ранее СГИ) с 1957 г. Была разработана широкая гамма клапанов различных конструкций (рис. 5), на которые получено более двадцати авторских свидетельств и патентов.

Отличием клапанов предложенных конструкций является отсутствие консольного закрепления пластин и пружин к седлу клапана (рис. 6). Вследствие этого пластины клапана во время работы перемещаются в основном только в верхней части паза. Замена ограничителя подъема пластин клапана установкой продольных пружин минимизирует ударную нагрузку и продлевает срок службы клапана в 2–3 раза по сравнению с кольцевыми.

Данное конструктивное преимущество означает отсутствие изгибающего момента в пластине в процессе эксплуатации, что в свою очередь привело к повышению надежности и долговечности клапана и позволило применить пружинно-рессорную сталь (65Г или 55С2) или высокоуглеродистую сталь после закалки и сред-

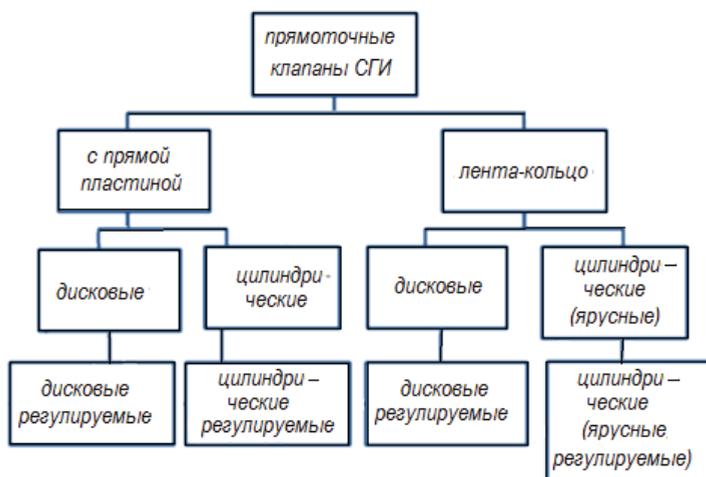


Рис. 5. Классификация прямоточных клапанов СГИ
Fig. 5. SGI direct-flow valves Classification

него отпуска вместо более дорогих импортных сталей [28].

Это решение увеличило срок службы клапана до десятков тысяч часов (15 000–20 000), тогда как пластины кольцевых клапанов, изготовленные из высококачественной импортной термообработанной стали, работают в 2 раза меньше. Например, наработка на отказ клапанов типа СГИ за 6 месяцев эксплуатации на компрессорной станции (КС) магистрального газопровода (МГ) «Бухара — Урал» составила 1224 ч, а у клапанов типа ПИК в тех же условиях на той же КС — в 6 раз меньше.

Увеличение долговечности клапанов конструкций СГИ достигается за счет кардинальной конструктивной модификации воздухораспределительных органов поршневых компрессоров. При этом клапаны типа СГИ более просты в обслуживании, чем клапаны ПИК. Для демонтажа, очистки, промывки и последующей сборки клапана ПИК тратится в 4–5 раз больше времени, чем у клапанов СГИ.

Клапаны СГИ эффективно работали в народном хозяйстве СССР с 1964 г. (Уфимский НПЗ им. XXII съезда КПСС, ГП Химпром (Волгоград), шахты Урала,

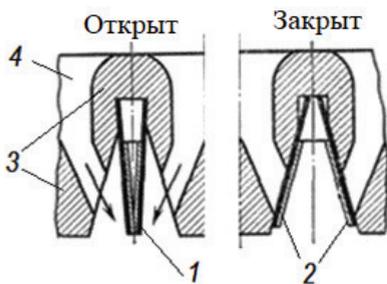


Рис. 6. Схема работы клапана СГИ: 1 — пластина, 2 — пружина, 3 — седло, 4 — протоочный канал

Fig. 6. Scheme of operation of the SMI valve: 1 — plate, 2 — spring, 3 — saddle, 4 — flow channel

«Севуралбокситруда», ОАО «Уралэлектромедь» и др.). Например, по рекомендации ВНИГМ им. М. М. Федорова выпускались с 1974 по 1979 г. на Горловском рудоремонтном заводе (УССР), и на шахты Донбасса было отправлено свыше 13 000 штук.

В связи с развалом СССР клапаны СГИ были незаслуженно забыты. В 90-е годы прошлого века промышленность России стала использовать более дорогие и малоэффективные импортные конструкции. В настоящих условиях при действии различных санкций Евросоюза с целью импортозамещения предлагается применять клапаны СГИ — как более эффективные и надежные¹.

Заключение

Предлагаемые конструктивные изменения клапанов поршневых компрессорных машин обеспечивают высокую долговечность, ремонтпригодность, производительность (примерно на 10%) и уменьшение потребления электроэнергии на производство сжатого воздуха на 13–15%.

Простая конструкция позволяет производить и ремонтировать клапаны СГИ в условиях предприятий, эксплуатирующих компрессоры.

Особенность клапанов данной конструкции позволяет использовать пружинно-рессорную (65Г или 55С2) или высокоуглеродистую сталь после закалки и среднего отпуска для изготовления пластин и пружин вместо более дорогих импортных сталей.

Вклад авторов: Все авторы внесли равный вклад в эту работу. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

¹ ОСТ 12.25.011-84. Экономия электрической энергии на угольных шахтах. Основные мероприятия и методы расчета. — М: Минуглепром СССР, 1984. — 137 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Humphreys D.* Mining productivity and the fourth industrial revolution // *Mineral Economics*. 2019, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1007/sl 3563–019–00172–9.
2. *Мастепанов А. М.* Водородная энергетика России: состояние и перспективы // *Энергетическая политика*. – 2020. – № 12(154). – С. 54–64. DOI: 10.46920/2409–5516_2020_12154_54.
3. *Хазин М. Л., Апакашев Р. А.* Карьерные самосвалы на водородном топливе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 1. – С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.
4. *Guo F-Y., Zhang Y-C., Wang Y., Ren P-J., Wang P.* Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Valve Based on Transfer Learning Convolutional Neural Network // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8891424, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2021/8891424>.
5. *Jarang H. G., Deshpande R. S.* The Survey on Reciprocating Gas Compressor – A Review // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2022, vol. 11, no. 6, pp. 389–393. DOI: 10.21275/SR22521125538.
6. *Michal V., Roman G.* Modeling reciprocating compressor valve dynamics // *AIP Conference Proceedings*. 2017, vol. 1889(1), 020049. <https://doi.org/10.1063/1.5004383>.
7. *Алфёрова Т. В., Широков О. Г., Горох И. А.* Автоматизация расчётов и выбора энергоэффективного компрессорного оборудования для предприятий нефтеперерабатывающей промышленности // *Агротехника и энергообеспечение*. – 2019. – № 3 (24). – С. 81–94.
8. *Степанов С. И., Митрофанова И. В.* Повышение энергетической эффективности систем снабжения промышленных предприятий сжатым воздухом // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 515–522. DOI: 10.20295/1815–588X-2019–3-515–522.
9. *Амарандо Г. Г., Мельник А. В., Сторожик С. О., Шулекин П. Б.* Бустерные поршневые компрессоры Краснодарского компрессорного завода – эффективное сочетание надежности и инноваций // *Нефть. Газ. Новации*. – 2022. – № 6 (259). – С. 77–80.
10. *Пластинин П. И.* Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет. – 3-е изд., доп. – М.: КолосС, 2013. – 456 с.
11. *Guo F-Y., Zhang Y-C., Wang Y., Wang P., Ren P-J., Guo R., Wang X-Y.* Fault Detection of Reciprocating Compressor Valve Based on One-Dimensional Convolutional Neural Network // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020, vol. 2020, article 8058723. <https://doi.org/10.1155/2020/8058723>.
12. *Han L., Jiang K., Wang Q., Wang X., Zhou Y.* Quantitative Evaluation on Valve Leakage of Reciprocating Compressor Using System Characteristic Diagnosis Method // *Applied sciences*. 2020, vol. 10, pp. 1946–1966. DOI: 10.3390/app10061946.
13. *Клименко Н. П., Кулиш О. В., Болдецкая А. М., Непряхин Е. Д.* Прогнозирование надежности судовых поршневых компрессоров // *Морские технологии: проблемы и решения: Научно-практическая конференция ФГБОУ ВО «КГМТУ»*. – Керчь, 2018. – С. 121–128.
14. *Кондратьева Т. Ф., Исаков В. П.* Клапаны поршневых компрессоров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 158 с.
15. *Сеидахмедов Н. С.* Исследования основных эксплуатационных характеристик работы клапанов поршневых компрессоров // *Sciences of Europe*. 2021, no. 79–1 (79), pp. 52–55. DOI: 10.24412/3162–2364–2021–79–1–52–55.
16. *Френкель М. И.* Поршневые компрессоры. – Л.: Машиностроение, 1969. – 744 с.
17. *Ляйтнер К.* Клапаны для поршневых воздушных компрессоров, имеющие наилучшее соотношение цены и качества // *Химическая техника*. – 2014. – № 9. – С. 25–27.

18. Samuel K. J., Raj R. T. K., Edison G. An Overview of Parameters Influencing the Performance of Hermetic Reciprocating Compressor for Domestic Applications // *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2018, vol. 26, no. 04, 1830003. <https://doi.org/10.1142/S2010132518300033>.

19. Wang Y., Xue C., Jia X., Peng X. Fault diagnosis of reciprocating compressor valve with the method integrating acoustic emission signal and simulated valve motion // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, vol. 56–57, pp. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.11.002>.

20. Li X., Ren P., Zhang Z., Jia X., Peng X. A p–V Diagram Based Fault Identification for Compressor Valve by Means of Linear Discrimination Analysis // *Machines*. 2022, vol. 10, no. 1, p. 53. <https://doi.org/10.3390/machines10010053>.

21. Berladir K., Hatala M., Hovorun T., Pavlenko I., Ivanov V., Botko F., Gusak O. Impact of Nitrocarburizing on Hardening of Reciprocating Compressor's Valves // *Coatings*. 2022, vol. 12, no. 5, pp. 574–586. <https://doi.org/10.3390/coatings12050574>.

22. Veiga A., Luno-Bilbao C., Sainz S., Castro F. Effect of low-pressure carburizing and plasma nitriding on mechanical properties and fatigue endurance limits of low alloy sintered steels // *Powder Metall.* 2020, vol. 63, pp. 75–79. <https://doi.org/10.1080/00325899.2020.1758883>.

23. Shu Y., Xiao J., Liu Z., Li F. Research on transient dynamic behavior and stress of reciprocating compressor valve under air volume regulation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022, vol. 2254(1), 012050. DOI:10.1088/1742-6596/2254/1/012050.

24. Wu W., Guo T., Peng C., Li X., Li X., Zhang Z., Xu L., He Z. FSI simulation of the suction valve on the piston for reciprocating compressors // *International Journal of Refrigeration*. 2022, vol. 137, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.01.028>.

25. Ваняшов А. Д., Крупников А. В. Применение метода анализа «Компрессор-сеть» для системы с поршневым компрессором и линией рециркуляции // *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. – 2020. – Т. 4. – № 2. – С. 56–63. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-56-63.

26. Хиникадзе И. Т., Кожемяченко А. В. Разработка компрессора повышенной производительности и надежности // *Colloquium-journal*. – 2022. – № 8–1 (131). – С. 8–11. DOI: 10.24412/2520-6990-2022-8131-8-11.

27. Hu Y. S., Wei H. Y., Xu Y., Kwan P., Wu F., Luo F. Y., Ren L. P. A theoretical study on the novel structure of vane compressor for high efficiency // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 604, 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012067.

28. Хазин М. Л., Волегов С. А. Повышение надежности клапана поршневого компрессора // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № 9. – С. 191–194. **МИАБ**

REFERENCES

1. Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*. 2019, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1007/sl 3563-019-00172-9.

2. Mastepanov A. M. Hydrogen power engineering in Russia: state and prospects. *Energeticheskaya politika*. 2020, no. 12(154), pp. 54–64. [In Russ]. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_12154_54.

3. Khazin M. L., Apakashev R. A. Hydrogen-powered mining trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 47–59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.

4. Guo F.-Y., Zhang Y.-C., Wang Y., Ren P.-J., Wang P. Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Valve Based on Transfer Learning Convolutional Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8891424, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2021/8891424>.

5. Jarang H. G., Deshpande R. S. The Survey on Reciprocating Gas Compressor A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2022, vol. 11, no. 6, pp. 389–393. DOI: 10.21275/SR22521125538.
6. Michal V., Roman G. Modeling reciprocating compressor valve dynamics. *AIP Conference Proceedings*. 2017, vol. 1889(1), 020049. <https://doi.org/10.1063/1.5004383>.
7. Alferova T. V., Shirokov O. G., Goroch I. A. Automation of calculations and selection of energy-efficient compressor equipment for petrochemical industries. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2019, no. 3 (24), pp. 81–94. [In Russ].
8. Stepanov S. I., Mitrofanova I. V. Improving energy efficiency of industrial enterprises' compressed air distribution systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 515–522. [In Russ]. DOI: 10.20295/1815–588X-2019–3-515–522.
9. Amarando G. G., Melnik A. V., Storozhik S. O., Shulekin P. B. Booster piston compressors of the Krasnodar Compressor Plant an effective combination of reliability and innovation. *Neft. Gas. Innovations*. 2022, no. 6 (259), pp. 77–80. [In Russ].
10. Plastinin P. I. Piston compressors. Vol. 1. Theory and calculation, 3rd ed., add. Moscow, KolosS. 2013, 456 p. [In Russ].
11. Guo F-y., Zhang Y-c., Wang Y., Wang P., Ren P-j., Guo R., Wang X-Y. Fault Detection of Reciprocating Compressor Valve Based on One-Dimensional Convolutional Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020, vol. 2020, article 8058723. <https://doi.org/10.1155/2020/8058723>.
12. Han L., Jiang K., Wang Q., Wang X., Zhou Y. Quantitative Evaluation on Valve Leakage of Reciprocating Compressor Using System Characteristic Diagnosis Method. *Applied sciences*. 2020, vol. 10, pp. 1946–1966. DOI: 10.3390/app10061946.
13. Klimenko N. P., Kulish O. V., Boldetskaya A. M., Nepryakhin E. D. Forecasting the reliability of ship reciprocating compressors. *Morskiye tekhnologii: problemy i resheniya: Scientific and practical conference of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KGMTU". Kerch*. 2018, pp. 121–128. [In Russ].
14. Kondratieva T. F., Isakov V. P. Valves of reciprocating compressors. Leningrad, Mashinostroenie, 1983. 158 p. [In Russ].
15. Seyidahmedov N. Research of basic performance characteristics of valves of piston compressors. *Sciences of Europe*. 2021, no. 79–1 (79), pp. 52–55. [In Russ]. DOI: 10.24412/3162–2364–2021–79–1-52–55.
16. Frenkel M. I. Piston compressors. Leningrad: Mashinostroenie, 1969. 744 p. [In Russ].
17. Leitner K. Valves for reciprocating air compressors with the best price-quality ratio. *Khimicheskaya tekhnika*. 2014, no. 9, pp. 25–27. [In Russ].
18. Samuel K. J., Raj R. T. K., Edison G. An Overview of Parameters Influencing the Performance of Hermetic Reciprocating Compressor for Domestic Applications. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2018, vol. 26, no. 04, 1830003. <https://doi.org/10.1142/S2010132518300033>.
19. Wang Y., Xue C., Jia X., Peng X. Fault diagnosis of reciprocating compressor valve with the method integrating acoustic emission signal and simulated valve motion. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, vol. 56–57, pp. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.11.002>.
20. Li X., Ren P., Zhang Z., Jia X., Peng X. A p–V Diagram Based Fault Identification for Compressor Valve by Means of Linear Discrimination Analysis. *Machines*. 2022, vol. 10, no. 1, p. 53. <https://doi.org/10.3390/machines10010053>.
21. Berladir K., Hatala M., Hovorun T., Pavlenko I., Ivanov V., Botko F., Gusak O. Impact of Nitrocarburizing on Hardening of Reciprocating Compressor's Valves. *Coatings*. 2022, vol. 12, no. 5. pp. 574–586. <https://doi.org/10.3390/coatings12050574>.
22. Veiga A., Luno-Bilbao C., Sainz S., Castro F. Effect of low-pressure carburizing and plasma nitriding on mechanical properties and fatigue endurance limits of low alloy sintered

steels. *Powder Metall.* 2020, vol. 63, pp. 75–79. <https://doi.org/10.1080/00325899.2020.1758883>.

23. Shu Y., Xiao J., Liu Z., Li F. Research on transient dynamic behavior and stress of reciprocating compressor valve under air volume regulation. *J. Phys. Conf. Ser.* 2022, vol. 2254, 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/2254/1/012050.

24. Wu W., Guo T., Peng C., Li X., Li X., Zhang Z., Xu L., He Z. FSI simulation of the suction valve on the piston for reciprocating compressors. *International Journal of Refrigeration.* 2022, vol. 137, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.01.028>.

25. Vanyashov A. D., Krupnikov A. V. Application of the Compressor-Network Analysis Method for a System with a Reciprocating Compressor and a Recirculation Line. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya «Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye».* 2020, vol. 4, no. 2, pp. 56–63. [In Russ]. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-56-63.

26. Khinikadze I. T., Kozhemyachenko A. V. Development of a compressor of increased performance and reliability. *Colloquium-journal.* 2022, no. 8–1 (131), pp. 8–11. [In Russ]. DOI: 10.24412/2520-6990-2022-8131-8-11.

27. Hu Y. S., Wei H. Y., Xu Y., Kwan P., Wu F., Luo F. Y., Ren L. P. A theoretical study on the novel structure of vane compressor for high efficiency. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2019, vol. 604, article 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012067.

28. Khazin M. L., Volegov S. A. Improving the reliability of the reciprocating compressor valve. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 9, pp. 191–194. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хазин Марк Леонтьевич — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Эксплуатация горного оборудования», ORCID ID: 0000-0002-6081-4474, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144, e-mail: Khasin@ursmu.ru;
Волегов Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Эксплуатация горного оборудования», ORCID ID: 0009-0000-2871-6826, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144, e-mail: sevolegov2015@yandex.ru;
Сокерина Ольга Владимировна — преподаватель кафедры «Эксплуатация горного оборудования», ORCID ID: 0009-0003-6663-4719, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144, e-mail: olga_vc@mail.ru.

Для контактов: *Хазин Марк Леонтьевич* e-mail: Khasin@ursmu.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khazin M. L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, ORCID iD: 0000-0002-6081-4474, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: Khasin@ursmu.ru;

Volegov S. A., Ph.D. (Eng.), Associate Professor, ORCID iD: 0009-0000-2871-6826, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: sevolegov2015@yandex.ru.

Sokerina O. V., teacher, ORCID iD: 0009-0003-6663-4719, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: olga_vc@mail.ru.

Corresponding author: *Khazin M. L.*, sevolegov2015@yandex.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 21.08.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 21.08.2023; accepted for printing 10.12.2023.

