

Научная статья

УДК 621.512

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-58-65

Хазин Марк Леонтьевич*, Волегов Сергей Александрович, Сокерина Ольга Владимировна

Уральский государственный горный университет

* для корреспонденции: olga_vc@mail.ru

НАДЕЖНОСТЬ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА



Информация о статье

Поступила:

31 октября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

14 ноября 2025 г.

Принята к печати:

15 ноября 2025 г.

Опубликована:

18 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

поршневой компрессор, клапан, пластина, надежность, изгибные напряжения, ударные нагрузки, выбор материала

Аннотация.

Статья посвящена вопросам надежности компрессорного оборудования, которое является источником сжатого воздуха, применяемого в горной промышленности. Основное внимание уделяется клапанам поршневых компрессоров, так как их неисправности приводят к длительным простоям. Исследования показывают, что до 60% отказов поршневых компрессоров связаны с проблемами клапанов, в то время как затраты на их ремонт составляют около 50% от общих затрат на техническое обслуживание последних.

Авторы анализируют существующие конструкции клапанов, включая прямооточные клапаны индивидуального типа (ПИК). Эти клапаны, несмотря на использование высокопрочных сталей, имеют ограниченный срок службы – около 2000 часов. Основные причины их выхода из строя – усталостное разрушение вследствие многократных ударов пластин о седло и их изгиба.

Для решения этой проблемы была разработана новая конструкция прямооточных клапанов типа СГИ в Уральском государственном горном университете. Основное отличие новой конструкции – отсутствие какого-либо закрепления пластин и пружин: они свободно «плавают» внутри пазов седла клапана. Это позволило увеличить срок службы до 15000-20000 часов, что в 6 раз превышает показатели клапанов ПИК.

Новые клапаны обладают рядом преимуществ: возможность использования отечественных пружинно-рессорных сталей, повышение производительности на 10%, снижение энергопотребления на 13-15% и вероятность безотказной работы к концу гарантийного срока, достигающая 0,84. Простота конструкции также облегчает обслуживание – время на демонтаж, чистку и сборку сокращается в 4-5 раз по сравнению с клапанами ПИК. Технологичность конструкции позволяет изготавливать клапаны, при необходимости, средствами механических мастерских предприятий, использующих клапаны.

Разработка и внедрение новых клапанов особенно актуальна в современных условиях для импортозамещения в компрессоростроении.

Для цитирования: Хазин М.Л., Волегов С.А., Сокерина О.В. Надежность поршневого компрессора // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 58-65. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-58-65, EDN: ORSZBD

Введение

Современная промышленность постоянно производит новые горные машины и механизмы, но неизменно важным остается основное энергетическое оборудование – компрессоры. Компрессоры являются источником сжатого воздуха, применяемого в горной промышленности, обеспечивающего работу различных пневматических инструментов, а также функционирование многих технологических процессов, в том числе бурение, вентиляцию, транспортировку и другие важные операции. Основными достоинствами воздушных компрессоров являются [1-3]: надежность, безопасность, эффек-

тивность, универсальность, а также транспортировка горной массы (пневмотранспорт).

Из практики известно, что из клапанов различных конструкций (тарельчатых, пластинчатых и т. п.) более надежными являются прямооточные клапаны. На основе анализа эмпирических данных и систематизации практических наблюдений можно сделать вывод о том, что среди разнообразных конструктивных решений клапанов, таких как тарельчатые, пластинчатые и другие модификации, более надежными являются прямооточные клапаны. Этот вывод подтверждается рядом исследований и

эксплуатационных данных, представленных в литературе [4-8].

В промышленных компрессорных системах, где основными параметрами являются эффективность и надежность, широкое применение нашли прямооточные клапаны индивидуального типа (ПИК). Эти клапаны характеризуются высокой степенью герметичности и минимальными гидравлическими потерями, что обеспечивает их эффективность в условиях интенсивной эксплуатации.

ПИК обладают рядом конструктивных особенностей, которые способствуют их высокой надежности и долговечности. К числу таких особенностей относятся оптимизированная геометрия проточной части, использование высококачественных материалов и передовых технологий изготовления. Эти факторы в совокупности позволяют ПИК эффективно функционировать в условиях высоких нагрузок и экстремальных температур, что делает их незаменимыми компонентами в системах компрессорного оборудования.

В промышленных компрессорах клапаны ПИК используются из-за их способности обеспечивать равномерное и точное прохождение газового потока. Это необходимо для поддержания оптимальных рабочих условий компрессорного оборудования.

Кроме того, прямооточные клапаны характеризуются высокой степенью износостойкости и долговечности, что существенно снижает эксплуатационные расходы и увеличивает межремонтные интервалы. Эти свойства обусловлены применением современных конструкционных материалов и инновационных технологических решений, направленных на минимизацию механического износа и предотвращение коррозионных процессов. В результате данные клапаны демонстрируют повышенную надежность и стабильность функционирования в различных эксплуатационных условиях, что подтверждается многолетним опытом их применения в различных отраслях промышленности.

Однако, как показывают многочисленные исследования эксплуатационных данных, компрессорное оборудование в значительной степени подвержено отказам, ведущим к дорогостоящим простоям. Одним из основных узлов поршневых компрессоров является клапан, осуществляющий впуск и выпуск газа. Неисправность клапана существенно снижает качество функционирования пневматической системы. Наиболее частой причиной отказа клапана является совместное действие усталостного разрушения и многократные удары о седло или ограничитель [9-12]. Проблема усталостного разрушения клапанных пластин носит фундаментальный характер и связана с циклическим характером нагружения. Каждый цикл работы компрессора сопровождается ударным воздействием пластины о седло, что приводит к возникновению знакопеременных изгибных напряжений.

Срок службы пластин клапана при ударной усталости оказывает большое влияние на энергосбережение и срок службы поршневых компрессоров [12]. Отказ (поломка) клапана приводит к простоя компрессора для проведения ремонта и зна-

чительным финансовым потерям, поскольку расходы на ремонт составляют до 50% от общей стоимости обслуживания компрессора [4-6]. Известно [1, 7, 8], что до 60% всех отказов поршневых компрессоров связаны с проблемами клапанов, обусловленных низкой долговечностью пластин. Однако в случае клапанов ситуация осложняется наличием ударной составляющей и влиянием рабочей среды, что требует проведения специализированных исследований для точного прогнозирования ресурса. В связи с этим для повышения надежности и увеличения срока службы клапанов пластины изготавливаются из высокопрочных легированных сталей, прошедших специальную термическую обработку и обладающих высокими механическими характеристиками.

Надежность работы компрессора определяется не только его бесперебойной работой, но и стабильностью параметров выходной среды. Неисправность клапана зачастую приводит не к мгновенной остановке, а к постепенной деградации характеристик: падению давления, увеличению пульсаций, загрязнению сжатого воздуха частицами износа и масла. Эти факторы критически влияют на работу пневматических исполнительных механизмов, систем автоматики и пневмотранспорта, вызывая брак продукции или нарушения технологии. Следовательно, надежность клапана напрямую коррелирует с качеством всего технологического цикла, основанного на использовании сжатого воздуха.

Остановка технологических циклов, например, при бурении скважин или работе пневматических систем транспортировки горной массы, приводит к срыву производственных планов, нарушению логистических цепочек и, как следствие, к финансовым потерям, многократно превышающим стоимость замены вышедшего из строя узла. Особое значение надежность компрессорного оборудования приобретает в контексте обеспечения безопасности ведения горных работ. Сжатый воздух используется для питания резервных систем аварийной вентиляции, противопожарного оборудования и средств жизнеобеспечения в аварийных ситуациях. Внезапный отказ компрессора в такой момент может иметь катастрофические последствия. Поэтому требования к безотказности и готовности систем сжатого воздуха в горной промышленности на порядок выше, чем в других отраслях. В условиях высокой конкуренции и требований к рентабельности горнопромышленных предприятий надежность каждого элемента энергетической инфраструктуры становится основным фактором экономической устойчивости и элементом системы промышленной безопасности.

В современных условиях санкционного давления со стороны Евросоюза и других недружественных стран и необходимости обеспечения технологического суверенитета задача импортозамещения критически важных компонентов промышленного оборудования, таких как компрессорные клапаны, выходит на первый план. Горнопромышленные производства и другие предприятия сталкиваются с

существенными рисками, связанными с зависимостью от поставок высокопрочных импортных сталей, например, Sandvik Hiflex. В связи с этим разработка надежных конструкций, позволяющих использовать отечественные стали и другие материалы, приобретает не только технико-экономическое, но и стратегическое значение.

Методы и результаты исследования.

Прямоточные клапаны ПИК предназначены для воздушных и газовых поршневых компрессоров, сжимающих различные газы, со смазкой и без смазки цилиндров, скорость вращения коленчатого вала которых составляет 700-1000 об/мин, а среднее время работы пластин клапана ПИК до первой поломки составляет 2000 часов¹. Это приводит к необходимости частых остановок оборудования, что нарушает производственный график.

Клапаны компрессора подвергаются динамическим нагрузкам, возникающим вследствие циклических изгибов и ударных воздействий. В связи с этим первостепенное значение приобретает совершенствование функциональных характеристик прямоточных клапанов в поршневых машинах. Для повышения их долговечности и эффективности в условиях интенсивного механического воздействия необходимо оптимизировать конструктивные и эксплуатационные параметры этих компонентов. Клапан ПИК компрессора выходит из строя вследствие зарождения и последующего роста усталостной трещины на его пластинке (язычке). В процессе накопления усталостных повреждений пластина клапана продолжает функционировать и клапан работает. Несмотря на то, что физический процесс износа является постепенным, его внешнее проявление для системы в целом носит случайный характер во временном масштабе наработки. При достижении накопленной деформации критического значения усталостная трещина начинает стремительно расти, и пластина разрушается. Поэтому отказ пластины клапана можно рассматривать как внезапный. Следовательно, для описания надежности клапана можно использовать экспоненциальное распределение времени между отказами. В экспоненциальной модели средняя наработка до отказа обратно пропорциональна интенсивности отказа

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{2000} = 5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч}.$$

Тогда вероятность безотказной работы пластины клапана ПИК можно описать следующим образом

$$P(t) = \exp(5 \cdot 10^{-4} t),$$

где t – текущее время.

На момент окончания гарантийного срока вероятность безотказной работы пластины клапана ПИК составляет всего 0,36 (Рис. 1).

Такая малая величина обусловлена конструкцией клапана, в которой пластина представляет собой жестко закрепленную между плитами седла сталь-

ную полосу с прорезями, образующими язычки. Данная полоса закреплена консольно и нагружена распределенной нагрузкой (q), которая достигает максимума на свободном конце (Рис. 2). В процессе работы клапана в условиях динамических нагрузок пластина вибрирует с частотой 15-17 Гц, что неизбежно приводит к накоплению усталостных повреждений в сечении закрепления и последующему разрушению.

С целью увеличения долговечности и надежности клапанов для изготовления пластин применяются высококачественные легированные стали зарубежного производства, отличающиеся высокой прочностью: Sandvik Hiflex, Sandvik 20C, Sandvik 7C27Mo2 и AISI 420, а также отечественные нержавеющие и пружинные стали 70C2XA и X15N9Ю.

Однако, как показывает практика, даже использование этих сталей не решает проблему кардинально, поскольку ресурс клапана остается невысоким. Это указывает на то, что «материальная» оптимизация исчерпала себя и необходимо принципиальное изменение конструкции.

В процессе эксплуатации поршневых компрессоров, функционирующих в условиях значительных нагрузок, первостепенное значение приобретает обеспечение оптимальной работы клапанов. В условиях эксплуатации, связанных с высокими ди-

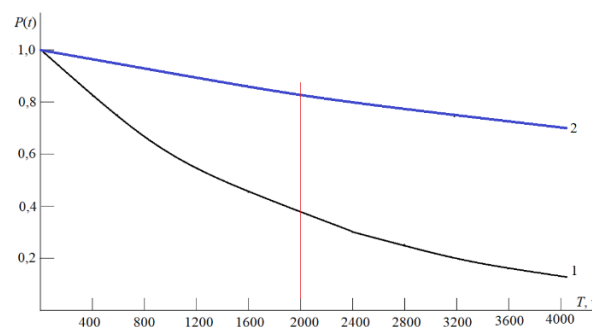


Рис. 1. Вероятность безотказной работы пластины клапана:

1 – клапан ПИК (сталь Sandvik Hiflex); 2 – клапан СГИ (сталь 45)

Fig. 1. The probability of trouble-free operation of the valve plate:

1 – PEAK valve (steel Sandvik Hiflex); 2 – SGI valve (steel 45)

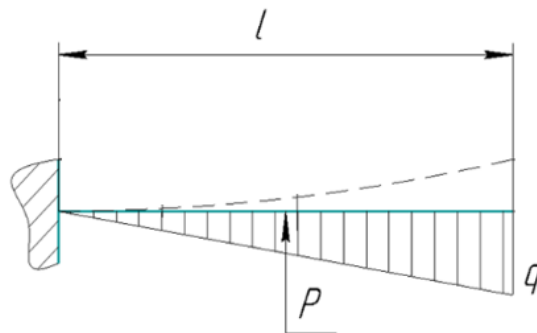


Рис. 2. Расчетная схема пластины

Fig. 2. Calculation scheme of the plate

¹Компания "Компрессорные технологии"
https://klapan-pik.ru/catalog/klapan/klapan_pik/

динамическими нагрузками и температурными перепадами, клапаны подвергаются значительным механическим и термическим воздействиям. Для обеспечения удовлетворительной функциональности систем необходимо применять комплексный подход, включающий проектирование на этапе разработки и систематическое техническое обслуживание на протяжении всего жизненного цикла. Данный подход позволяет минимизировать вероятность возникновения системных сбоев и обеспечивает стабильную работу оборудования в различных эксплуатационных условиях.

Следует отметить, что совершенствование конструкции клапанов напрямую влияет на производительность и надежность поршневых компрессоров, а также на их способность поддерживать стабильные параметры сжатого воздуха. Работа клапанов оказывает непосредственное влияние на минимизацию утечек, что, в свою очередь, существенно снижает энергетические затраты и значительно продлевает срок службы компрессора.

Стабильная работа клапана позволяет повысить общую эффективность пневматической системы и минимизировать эксплуатационные затраты. Для обеспечения высокой надежности работы клапанов необходимо минимизировать воздействие факторов, которые могут привести к разрушению пластин и уплотнительных элементов. С этой целью применялись различные варианты: регулировка давления всасывающего клапана открытия [13, 14], применение метода анализа «Компрессор – сеть» [15], дополнительная термообработка пластин [16, 17] и даже применение нейронных сетей [1]. Однако перечисленные методы являются лишь временными мерами. Эти подходы позволяют лишь предсказывать возможные отказы или незначительно (на 20–30%) продлевать срок службы, не устраняя основную проблему – несовершенную динамическую схему нагружения. Оптимизация рабочих режимов также имеет ограниченные возможности, поскольку ограничена технологическими требованиями. Лучшим решением является изменение конструкции клапана, направленное на устранение первопричин его отказа.

В рамках инновационных исследований, проводимых в Уральском государственном горном университете (УГГУ), была проведена комплексная модернизация конструкций клапанов, направленная на устранение указанных недостатков. Была разработана серия клапанов СГИ (Свердловский горный институт) различных конструкций, на которые получено более двадцати авторских свидетельств и патентов. Разработка новых конструкций клапанов проходила с использованием общемировых тенденций машиностроения, направленных на снижение массы подвижных частей, минимизацию инерционных нагрузок и применение принципов «безударной» кинематики.

Основным отличием клапанов разработанных конструкций является отсутствие какого-либо закрепления пластин и пружин – они свободно «плавают» внутри пазов седла клапана.

Пластина перемещается в пазу, а ее подъем ограничивается установкой продольных пружин, что минимизирует ударные нагрузки и полностью исключает изгибающий момент. Вследствие этого пластины клапана в рабочем режиме движутся в основном только в верхней части паза. Установка продольных пружин вместо ограничителя подъема пластин исключает удары и повышает срок службы клапана минимум в 3–4 раза. Основным видом нагрузки становится давление на опорную поверхность, а демпфирование удара обеспечивается продольными пружинами. Это позволяет снизить пиковые динамические нагрузки на порядок.

Увеличение срока службы клапана СГИ свидетельствует о кардинальном снижении интенсивности отказов. Этот эффект может быть формализован через введение коэффициента конструктивного совершенства ($K_{КС}$), показывающего, во сколько раз новая конструкция снижает интенсивность отказов по сравнению с базовой:

$$K_{КС} = \frac{T_{ср.СГИ}}{T_{ср.ПИК}} = \frac{\lambda_{ПИК}}{\lambda_{СГИ}}$$

Подставляя известную среднюю наработку до отказа, получаем: $K_{КС} \approx 8,75$. Данный коэффициент количественно подтверждает, что принцип свободного перемещения пластины позволяет снизить скорость накопления повреждений почти на порядок.

Энергосбережение при использовании клапанов СГИ обусловлено комплексом факторов, включающих в себя как конструктивные, так и эксплуатационные особенности. Прежде всего улучшенная аэродинамика клапана с гибким подвижным элементом способствует минимизации гидравлических потерь на стадии всасывания и нагнетания.

Герметизация клапанного механизма, обеспечиваемая оптимально настроенной системой пружин, существенно снижает эффект обратного расширения газа из цилиндрической полости в магистраль. Данный феномен, известный как «гидравлический удар», является значительным источником энергетических потерь в компрессорных системах. Минимизация этого явления напрямую способствует повышению объемного коэффициента полезного действия (КПД) устройства.

Снижение вибрационной нагрузки на клапанный узел приводит к уменьшению паразитных механических потерь, что в свою очередь повышает общую эффективность и надежность системы. Кроме того, более простая конструкция клапанов типа СГИ облегчает их обслуживание. Для демонстрации, чистки, промывки и последующей сборки клапанов СГИ требуется в 4–5 раз меньше времени по сравнению с клапанами ПИК.

Таким образом, комплексный подход к оптимизации конструкции и эксплуатации клапанов СГИ позволяет значительно повысить энергоэффективность компрессорных установок, что является важным фактором в условиях растущих требований к энергоэффективности и экологической безопасности промышленного оборудования.

Данное конструктивное решение позволило значительно продлить срок эксплуатации клапана

до десятков тысяч часов (15 000–20 000), что подтвердилось при проведенных испытаниях опытного образца на компрессорной станции (КС) магистрального газопровода (МГ) «Бухара – Урал», когда клапаны типа ПИК в тех же условиях проработали в 6 раз меньше.

На момент окончания гарантийного срока клапана ПИК (вероятность безотказной работы которого 0,36, материал пластины – сталь Sandvik Hiflex) вероятность безотказной работы клапана СГИ составляла 0,84 (материал пластины – закаленная сталь 45) (см. Рис. 1). Ввиду отсутствия изгибных напряжений вместо дорогих импортных сталей можно использовать более дешевую российскую пружинно-рессорную сталь (65Г или 55С2) или высокоуглеродистую сталь после закалки и среднего отпуска [18], поскольку применение даже конструкционной стали 45 в предлагаемой конструкции уже существенно повысило надежность пластины клапана и, соответственно, компрессора в целом.

Повышение надежности клапана оказывает мультипликативный эффект на надежность компрессора в целом. Если рассматривать компрессор как последовательную систему, состоящую из n ключевых узлов (клапаны, поршневая группа, кривошипно-шатунный механизм и т. д.), то его вероятность безотказной работы за время t определяется как произведение вероятностей безотказной работы всех его основных элементов:

$$P_{\text{компрессор}}(t) = P_{\text{кл1}}(t) \cdot P_{\text{кл2}}(t) \cdot \dots \cdot P_n(t)$$

Поскольку обычно в компрессоре установлено несколько клапанов и они все являются одними из наименее надежных элементов, это в значительной степени определяют надежность системы. Замена комплекта клапанов ПИК на клапаны СГИ приведет к значительному росту вероятности безотказной работы всего компрессора.

Проиллюстрируем эффект от замены клапанов на примере компрессора, в котором установлено четыре клапана. Вероятность безотказной работы других ответственных узлов компрессора примем за $P_n(t) = 0,9$ за время $t = 2000$ часов.

Для компрессора с клапанами ПИК:

$$P_{\text{компрессор}}(2000) = 0,90 \cdot (0,36)^4 = 0,015.$$

Для компрессора с клапанами СГИ:

$$P_{\text{компрессор}}(2000) = 0,90 \cdot (0,84)^4 \approx 0,45.$$

Как видно из расчета, замена комплекта клапанов повышает надежность всего компрессора и значительно снижает риск простоев.

Для более точного анализа можно учесть, что отказ одного клапана не всегда приводит к немедленной остановке всего компрессора. В некоторых режимах компрессор может продолжать работу с пониженной производительностью. В этом случае может быть применена более сложная модель, например, с резервированием или с учетом градации состояний (работоспособное, частично работоспособное, неработоспособное). Тем не менее, даже в таких моделях низкая надежность клапанов остается критическим фактором, так как их отказы являются наиболее частой причиной не только пол-

ных остановок, но и работы в неоптимальных режимах, что ведет к повышенному износу других узлов и перерасходу энергии. Это имеет значительное значение в долгосрочной перспективе, так как оптимизация эксплуатационных параметров и снижение износа основных компонентов способствуют повышению общей эффективности и долговечности компрессорной системы.

Итоговые сравнительные характеристики клапанов ПИК и СГИ объединены в Таблице 1, дополненной также данными по трудозатратам на техническое обслуживание клапанов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики клапанов ПИК и СГИ

Table 1. Comparative characteristics of PEAK and SGI valves

Параметр	Клапан	
	ПИК	СГИ
Срок службы, час	2000	15000-20000
Вероятность безотказной работы за 2000 часов	0,36	0,84
Трудозатраты на ТО, час	2	0,4
Материалы пластин	Sandvik Hiflex, импортные стали	65Г, 55С2 отечественные стали

Возможность использования отечественных материалов и производства клапанов – именно клапанов СГИ, как более надежных и эффективных, силами местных машиностроительных предприятий вносит вклад в решение задачи импортозамещения и повышение технологического суверенитета.

Выводы

Конструкция клапанов имеет решающее значение в обеспечении надежной работы компрессора. Предлагаемые изменения конструкции клапанов поршневых компрессоров обеспечивают значительное повышение надежности, ремонтпригодности, производительности (примерно на 10%) и снижение на 13–15% энергопотребления на производство сжатого воздуха.

Количественно эффективность новой конструкции подтверждается коэффициентом конструктивного совершенства 8,75, показывающим почти порядковое снижение интенсивности отказов, что непосредственно отражается в росте вероятности безотказной работы.

Конструкция клапанов позволяет для изготовления пластин и пружин отказаться от дорогих импортных сталей и применять российские пружинно-рессорные стали 65Г или 55С2 или высокоуглеродистую сталь после закалки и среднего отпуска. Такая замена значительно снижает затраты на производство, поскольку исключает более дорогие импортные материалы. Простота конструкции позволяет легко производить и ремонтировать клапаны СГИ на предприятиях, где используются компрес-

соры. Поэтому данная модель является не только готовым решением, но и фундаментом для создания нового поколения высоконадежных и энергоэффективных клапанов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 ID 8891424. 13 p. DOI: 10.1155/2021/8891424.
2. Jarang H. G., Deshpande R. S. The Survey on Reciprocating Gas Compressor – A Review // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2022. Vol. 11. № 6. Pp. 389-393. DOI: 10.21275/SR22521125538.
3. 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.
4. Sotoodeh K., Gudmestad O. T. Safety and reliability improvement of valves and actuators in the of shore oil and gas industry // *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. 2022. Vol. 11. Pp. 293-302.
5. Sawant O., Mane P., Verma U. Fatigue Modeling of Reed Valve as a Function of Crank Angle for Piston Compressor // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021. Vol. 08. № 08. Pp. 1010-1015.
6. Файрушин Ш. З., Байков И. Р., Китаев С. В. Определение показателей надёжности поршневых компрессоров // *Нефтегазовое дело*. 2016. Т. 15. № 2. С. 120-124.
7. 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.
8. Хазин М. Л., Волегов С. А., Сокерина 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.
9. Сеидахмедов Н. С. Исследования основных эксплуатационных характеристик работы клапанов поршневых компрессоров // *Sciences of Europe*. 2021. № 79-1 (79). С. 52-55. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-79-1-52-55.
10. Rahimdel M. J., Ghodrati B. Reliability analysis of the compressed air supplying system in underground mines // *Scientific Reports*. 2023. № 13. P. 6836. DOI: 10.1038/s41598-023-33736-5.
11. 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. № 1. P. 53. DOI: 10.3390/machines10010053.
12. Zhang J., Yin W., Shi Y., Gao Z., Pan L., Li Y. Effects of the Damping Parameters on the Opening and Closing Characteristics of Vent Valves // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 10. Pp. 5169. DOI: 10.3390/app12105169.
13. 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.
14. 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. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.01.028.
15. Ваяншов 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.
16. 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. № 5. Pp. 574-586. DOI: 10.3390/coatings12050574.
17. 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. DOI: 10.1080/00325899.2020.1758883.
18. Хазин М. Л., Волегов С. А. Повышение надежности клапана поршневого компрессора // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 9. С. 191-194.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: Khasin@ursmu.ru

Волегов Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: Volegov@ursmu.ru

Сокерина Ольга Владимировна – старший преподаватель кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: olga_vc@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Хазин Марк Леонтьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, разработка методологии, выводы, написание текста.

Волегов Сергей Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, разработка методологии, выводы, написание текста.

Сокерина Ольга Владимировна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, разработка методологии, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-58-65

Mark L. Khazin, Sergey A. Volegov, Olga V. Sokerina

Ural State Mining University

* for correspondence: olga_vc@mail.ru

RELIABILITY OF THE RECIPROCATING COMPRESSOR



Article info

Received:

31 October 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

18 December 2025

Keywords: reciprocating compressor, valve, plate, reliability, bending stresses, shock loads, material selection.

Abstract.

The article discusses the problem of reliability of compressor equipment, which is a key source of compressed air for various industrial processes. Special attention is paid to the valves of reciprocating compressors, as their malfunctions lead to significant production downtime. Studies show that up to 60% of all reciprocating compressor failures are related to valve assembly problems, with repair costs accounting for about 50% of total maintenance costs. The authors analyze the existing valve designs, in particular, single-flow valves (PIK), which, despite the use of high-strength steels, have a limited service life (about 2000 hours). The main causes of failure of such valves are fatigue failure and repeated impacts on the seat. As a solution to the problem, the development of new designs of valves of the CGI type, created at the Ural State Mining University, is presented. The main difference of the new design is the absence of cantilever fastening of plates and springs to the valve seat. This significantly increased the service life to 15,000-20,000 hours, which is 6 times higher than the PEAK valves. An important advantage of the new valves is the possibility of using domestic spring-steel steels instead of expensive imported analogues. In addition, the design of the CGI valves provides a 10% increase in productivity and a 13-15% reduction in energy consumption. The probability of trouble-free operation of such valves by the end of the warranty period reaches 0.84. The simplicity of the design of the new valves also greatly facilitates their maintenance – the time for disassembly, cleaning and assembly is reduced by 4-5 times compared to PEAK valves. The developments are especially relevant in modern conditions for import substitution in the compressor industry..

For citation: Khazin M.L., Volegov S.A., Sokerina O.V. Reliability of the reciprocating compressor. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 6(182):58-65 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-58-65, EDN: ORSZBD

REFERENCES

1. 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; 2021:8891424. 13 p. DOI: 10.1155/2021/8891424.

2. Jarang H. G., Deshpande R. S. The Survey on Reciprocating Gas Compressor – A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2022; 11(6):389-393. DOI: 10.21275/SR22521125538.

3. Stepanov S. I., Mitrofanova I. V. Improving the energy efficiency of compressed air supply systems for industrial enterprises. *Proceedings of Petersburg*

Transport University. 2019; 16(3): 515-522. [In Russ]. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-515-522.

4. Sotoodeh K., Gudmestad O. T. Safety and reliability improvement of valves and actuators in the of shore oil and gas industry. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. 2022; 11:293-302.

5. Sawant O., Mane P., Verma U. Fatigue Modeling of Reed Valve as a Function of Crank Angle for Piston Compressor. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021; 08(08): 1010-1015.

6. Fayrushin Sh.Z., Baikov I.R., Kitaev S.V. Determination of reliability indicators of piston compressors. *Oil and Gas Business*. 2016; 15(2):120-124. [In Russ].

7. Zhang J., Yin W., Shi Y., Gao Z., Pan L., Li Y. Effects of the Damping Parameters on the Opening and Closing Characteristics of Vent Valves. *Applied Sciences*. 2022; 12(10):5169. DOI: 10.3390/app12105169.

8. 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.

9. Seidakhmedov N.S. Studies of the main operational characteristics of reciprocating compressor valves. *Sciences of Europe*. 2021; 79-1(79):52-55. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-79-1-52-55.

10. Rahimdel M.J., Ghodrati B. Reliability analysis of the compressed air supplying system in underground mines. *Scientific Reports*. 2023; 13:6836. DOI: 10.1038/s41598-023-33736-5.

11. 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; 10(1):53. DOI: 10.3390/machines10010053.

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; 10:1946-1966. DOI: 10.3390/app10061946.

13. 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; 2254(1): 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/2254/1/012050.

14. 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; 137:14-21. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.01.028.

15. 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; 4(2):56-63. [In Russ]. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-56-63.

16. 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; 12(5):574-586. DOI: 10.3390/coatings12050574.

17. 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; 63:75-79. DOI: 10.1080/00325899.2020.1758883.

18. Khazin M.L., Volegov S.A. Improving the reliability of the reciprocating compressor valve. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015; 9:191-194. [In Russ].

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Mark L. Khazin – Dr. Sc. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Mining Equipment Operation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Kuibyshev str., 30, e-mail: Khasin@ursmu.ru

Sergey A. Volegov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Mining Equipment Operation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Kuibysheva St., 30 e-mail: Volegov@ursmu.ru

Olga V. Sokerina – Senior Lecturer at the Department of Mining Equipment Operation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Kuibysheva St., 30, e-mail: olga_vc@mail.ru

Contribution of the authors:

Mark L. Khazin – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, development of methodology, conclusions, writing the text;

Sergey A. Volegov – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, development of methodology, conclusions, writing the text;

Olga V. Sokerina – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, development of methodology, conclusions, writing the text;.

Authors have read and approved the final manuscript.

