

УДК 692.7.036

DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-18-27

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И МЕРЫ ПО УСТРАНЕНИЮ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КЛАПАНОВ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА 4М125

ЮЙ ЯНЬЯН^{1, 2}, А. Б. НЕВЗОРОВА²

¹Китайская Чжэцзянская нефтехимическая компания, остров Юйшань, город Чжоушань, провинция Чжэцзян, Китайская Народная Республика

²Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Описаны факторы, влияющие на производительность и срок службы клапанов поршневых компрессоров. Установлено, что срок службы пластин клапанов из полиэфирэфиркетона поршневых компрессоров зависит от геометрии и циклической кинематики пластин, переходных напряжений и свойств материала. За счет внесения изменений в конструкцию воздушного клапана значительно увеличен срок службы пластины клапана, снижена частота технического обслуживания агрегата, а также повышена надежность конструкции пластины клапана и улучшена стабильность работы устройства. Изменение скорости впрыска масла в форсунку и стабилизация нагрузки системы бесступенчатого регулирования объема газа позволило повысить стабильность работы и увеличить срок службы воздушного клапана.

Ключевые слова: воздушный клапан, компрессор, конструкция, поршневой узел, гидрокрекинг.

Для цитирования. Юй, Я. Анализ факторов и меры по устранению неисправностей клапанов поршневого компрессора 4М125 / Я. Юй, А. Б. Невзорова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 18–27. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-18-27

ANALYSIS OF FACTORS AND MEASURES TO ELIMINATE THE MALFUNCTIONS OF PISTON COMPRESSOR VALVES 4M125

YU YANGYANG^{1, 2}, A. B. NEVZOROVA²

¹China Zhejiang Petrochemical Company., Yushan Island, Zhoushan City, Zhejiang Province, People's Republic of China

²Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article describes the factors influencing the performance and service life of piston compressor valves. It has been established that the service life of polyetheretherketone valve plates of piston compressors depends on the geometry and cyclic kinematics of the plates, transient voltages and material properties. Due to changes in the design of the air valve, the service life of the valve plate has been significantly expanded, the frequency of unit maintenance has been reduced, while the reliability of the valve plate design has been increased and the stability of the device is improved. Changing the rate of oil injection into the nozzle and stabilizing the load of the stepless gas volume regulation system made it possible to increase the stability of operation and increase the service life of the air valve.

Keywords: air valve, compressor, design, piston unit, hydrocracking.

For citation. Yu Y., Nevzorova A. B. Analysis of factors and measures to eliminate the malfunctions of piston compressor valves 4M125. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3 (102), pp. 18–27 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-18-27

Введение

Совершенствование технической диагностики оборудования нефтехимической промышленности связано с комплексом мероприятий, направленных на определение технического состояния оборудования, выявление дефектов и неисправностей, а также прогнозирование остаточного ресурса для обеспечения безопасной и эффективной работы. Это важная часть технического обслуживания, позволяющая предотвращать аварии, снижать затраты на ремонт и повышать надежность оборудования [1–3].

Диагностирование технических объектов включает в себя оценку технического состояния объекта, обнаружение и определение места локализации неисправностей, прогнозирование остаточного ресурса объекта и мониторинг технического состояния объекта. Установка гидрокрекинга дизельного топлива, в сочетании с компрессором, является ключевым компонентом в современной нефтепереработке, позволяющим улучшать качество дизельного топлива и других нефтепродуктов [4].

Анализ долговечности этого оборудования показал, что одной из основных причин поломки является выход из строя пластины клапана компрессора.

Пластина клапана компрессора находится в центре возвратно-поступательного механизма и принимает на себя большую часть нагрузок, связанных с работой компрессора. Кроме того, она находится в непосредственном контакте с воздухом, газом или жидкостями, проходящими через компрессор, и подвергается воздействию как коррозионных факторов, так и высокого давления и температуры.

Воздушный клапан – это фитинговая часть поршневого компрессора. Для обеспечения стабильной работы поршневого компрессора пластина воздушного клапана должна обладать определенной термостойкостью и герметичностью. Разешение проблемы впрыска впускного клапана воздушного компрессора включает понимание и решение задач, связанных с утечками, проблемами обратных клапанов и отказами системы распределения масла. Регулярное техническое обслуживание и своевременное устранение неисправностей необходимы для оптимальной работы компрессора [5, 6].

В данной работе в качестве объекта исследования были выбраны уплотнительные клапаны уплотнительной камеры компрессора.

Цель работы – провести техническую диагностику и анализ динамического режима и виброусталостных свойств клапанных дисков из полиэфирэфиркетона (ПЕЕК) в возвратно-поступательной машине 4M125 и оптимизировать систему бесступенчатого регулирования объема газа для обеспечения теоретической основы стабильной и долговечной работы уплотнительного клапана.

Характеристики установки гидрокрекинга и поршневого компрессора типа 4M125

Установка гидрокрекинга дизельного топлива мощностью 3,5 млн т/год для одной нефтехимической компании спроектирована с использованием двухступенчатой технологии полного цикла гидрокрекинга дизельного топлива с фиксированным слоем.

В установке гидрокрекинга дизельного топлива поршневые компрессоры используются для повышения давления водорода, подаваемого в реактор, где при высоких температурах и давлении происходит расщепление (крекинг) и гидрирование (насыщение водородом) углеводородов сырья для производства низкосернистого дизельного топлива с улучшенными свойствами. В качестве сырья в установке используется прямогонное дизельное топливо, каталитическое дизельное топливо, дизельное топливо для крекинга остатков шламового слоя и нефтя для производства тяжелой нефти и легкой нефти в качестве побочного продукта. Установка состоит

из реакционной секции (включая двухступенчатую реакционную секцию, секцию обессеривания циркулирующим водородом и секцию циркулирующего водородного компрессора), новой секции водородного компрессора, секции фракционирования, секции извлечения легких углеводородов и секции очистки продукта [1, 2].

Крупномасштабный поршневой компрессор высокой тяги 4М125 оснащен тремя поршневыми блоками *A*, *B* и *S*. При обычной эксплуатации два из них находятся в рабочем состоянии, а один – в режиме ожидания. Этот блок служит основным оборудованием установки гидрирования, а два рабочих блока обеспечивают подачу водорода высокого давления со скоростью 160000 Нм³/ч для реакционной части устройства. Устройство имеет конфигурацию из четырех колонн. Газообразный водород из трубопроводной сети системы на первом этапе сжимается компрессором, и давление повышается с 4,8 до 8,5 МПа. После охлаждения и отделения жидкости он поступает в цилиндр второй ступени компрессора для сжатия, и давление на выходе второй ступени составляет 14 МПа [3]. Основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики поршневого компрессора типа 4М125

Серийный номер	Обозначение	Проектные данные
1	Модель компрессора	4М125
2	Номинальная мощность, кВт	5700
3	Количество цилиндров	4
4	Основное внешнее давление (МПа)	8,6
5	Вторичное внешнее давление (МПа)	15,1
6	Скорость вращения (об/мин)	333
7	Номинальный расход (Нм ³ /ч)	97514
8	Материал диска клапана	РЕЕК
9	Материал пружины клапана, преципитационно-твердеющая нержавеющая сталь	17-7 PH

Материалы, используемые в пластинах клапанов компрессора

Традиционно для этой цели использовались металлы. Хотя металлы недороги, могут выдерживать сильные удары в течение длительного времени и не подвержены влиянию давления или температуры, всегда существовала проблема коррозии. С появлением новых жидкостей стало необходимым использовать материалы, которые не вступают в реакцию с различными химическими веществами, проходящими через компрессор. Коррозия металлических пластин компрессора также может привести к образованию сколов и трещин. Хотя треснувшую пластину можно заменить на месте, любой металлический обломок, отделившийся от пластины, может попасть в другое место оборудования и привести к дополнительным повреждениям.

Металлические пластины также плохо защищают от проникновения посторонних частиц. Кусочек грязи или песка, что часто неизбежно в промышленных условиях, может застрять внутри оборудования, поскольку металлическая пластина не деформируется и не впитывает частицы.

После многократного тестирования в качестве пластин для клапанов компрессоров стали использовать полиэфирэфиркетон, он же РЕЕК, – высокоэффективный тугоплавкий конструкционный термопласт, один из наиболее жестких полимеров с исключи-

тельными характеристиками: плотность $1,3 \text{ г/см}^3$; температура плавления $343 \text{ }^\circ\text{C}$; температура стеклования $143 \text{ }^\circ\text{C}$; температура эксплуатации – от -70 до $+230 \text{ }^\circ\text{C}$, выдерживает краткосрочные нагревы до $300 \text{ }^\circ\text{C}$; предел текучести 120 МПа . РЕЕК не содержит в своей структуре токсичных химикатов, является огнестойким (класс воспламеняемости по стандарту UL94 – V0), обладает высокими тепло- и электроизоляционными свойствами, низким коэффициентом трения, стойкостью к большинству органических и неорганических химикатов [10].

Техническая диагностика. Описание неисправности диска клапана

С момента начала работы установки поршневого компрессора типа 4М125 в сентябре 2021 г. она ремонтировалась 11 раз, и 25 комплектов воздушных клапанов были заменены из-за поломок клапанных пластин, из которых 22 комплекта не выработали свой срок службы.

После разборки воздушного клапана было обнаружено, что все повреждения пластины клапана были вызваны разрушением на внешнем краю пластины без предварительной пластической деформации.

Судя по месту излома, макроскопическая поверхность излома была относительно плоской и шероховатой, со ступеньками на внутренней стороне и поверхностными трещинами, которые выходили за пределы впускной канавки (рис. 1). Распространение трещин было радиальным, а начальный участок был относительно плоским и мелким, с изогнутой вершиной трещин. Пластина клапана частично треснула, что в основном обусловлено его простом из-за аномального перепада температур.

Установлено, что воздушный клапан, как правило, трескается по внешнему краю, что вызвано главным образом локальными или множественными трещинами на внешней кромке клапанной пластины (рис. 1).



Рис. 1. Изображение повреждения пластины клапана

Анализируя количество поврежденных воздушных клапанов, можно отметить, что большинство неисправных воздушных клапанов – это выпускные, на долю которых приходится около 70 %, а на долю неисправностей впускных приходится около 30 %. Количество поврежденных клапанов первичного и вторичного воздуха не сильно отличается, а время работы неисправных воздушных клапанов обычно составляет всего от 1000 до 3000 часов, что значительно меньше обычного срока службы воздушных клапанов. Статистика по времени, месту и наработке неисправного воздушного клапана с момента запуска устройства приведена в табл. 2.

Таблица 2

Период работы неисправных клапанов

Номер блока	Время сбоя	Положение воздушного клапана	Количество	Время плавной работы воздушного клапана, ч
B	12.27.2021	Первичный выпускной клапан	4	1041
B	04.17.2022	Первичный выпускной клапан	1	1360
B	06.14.2022	Вторичный выпускной клапан	2	2100
A	06.18.2022	Первичный выпускной клапан/ первичный выпускной клапан	2	4480
B	06.26.2022	Первичный выпускной клапан	2	2500
A	08.18.2022	Первичный выпускной клапан/ первичный выпускной клапан	2	5680
B	08.21.2022	Вторичный выпускной клапан/вторичный выпускной клапан	2	2405
A	10.05.2022	Один вторичный выпускной клапан/ два вторичных выпускных клапана	3	7120
B	11.22.2022	Два первичных выпускных клапана/ один первичный выпускной клапан	3	2230
A	01.23.2023	Первичный выпускной клапан	1	4532
A	04.06.2023	Вторичный выпускной клапан/ вторичный выпускной клапан	8	9110
A	05.02.2023	Первичный выпускной клапан	1	9110
S	06.02.2023	Первичный выпускной клапан	2	12618
S	10.07.2023	Первичный выпускной клапан	2	1171

Когда возвратно-поступательная машина работает в нормальном режиме, разница температур между одними и теми же боковыми воздушными клапанами невелика, обычно в пределах 1 °С.

Когда в одном из воздушных клапанов возникает неисправность, например, повреждение пластины клапана из-за высокой температуры сжатого газа, часть которого возвращается в камеру сжатия через поврежденную часть воздушного клапана, это приводит к повышению температуры на выходе воздушного клапана [6]. В результате этого температура выхлопа значительно отличается от температуры того же бокового воздушного клапана, как показано на рис. 2.

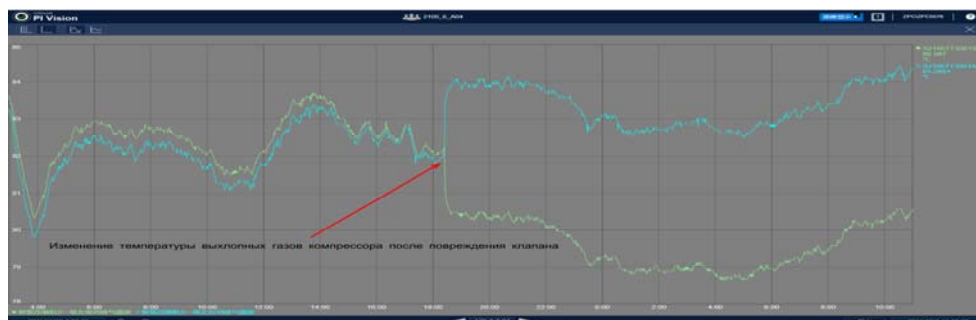


Рис. 2. Диаграмма изменения температуры выхлопных газов бокового клапана при ненормальном срабатывании клапана, отображенная в системе DCS (распределенной системе управления)

Анализ динамического режима и виброусталостных свойств клапанных дисков из полиэфирэфиркетона (РЕЕК)

Конструкция клапанной пластины устройства представляет собой плоский сетчатый клапан, как показано на рис. 3. Усилие, воздействующее на клапанную пластину, неравномерно, например, из-за поломки пружины, примесей в газе или локального повреждения клапанной пластины. Усилие, воздействующее на клапанную пластину, будет относительно сложным, особенно из-за относительно концентрированной структуры внешней кромки клапанной пластины, что может легко привести к разрушению конструкции внешней кромки клапанной пластины, приводящему к выходу большого количества сжатых выхлопных газов и чрезмерно высокой температуре выхлопных газов агрегата [7, 8].



Рис. 3. Структурная схема сетчатого клапана

В результате анализа конструкции сетчатой клапанной пластины установлено, что вырезы прямоугольной формы неустойчивы с точки зрения прикладываемых усилий. Когда усилие сосредоточено, по краям и углам могут образовываться трещины. С изменением времени эксплуатации трещины также могут увеличиваться, что приводит к выходу из строя клапанной пластины.

Если используется круглая клапанная пластина с профилем, то она может быть преобразована из единой конструкции в клапанную пластину, состоящую из множества внутренних и внешних колец. При отклонении от нормальных условий эксплуатации расстояние между кольцами клапанной пластины невелико, но концентрация напряжений в клапанной пластине значительно повышается. Для устранения этого явления предлагается внести соответствующие изменения в седло клапана и закруглить кромку клапанной пластины [9], чтобы эффективно снизить вероятность образования трещин и устранить проблему сосредоточенных напряжений на кромке пластины. Предлагаемая конструкция профиля клапана показана на рис. 4.

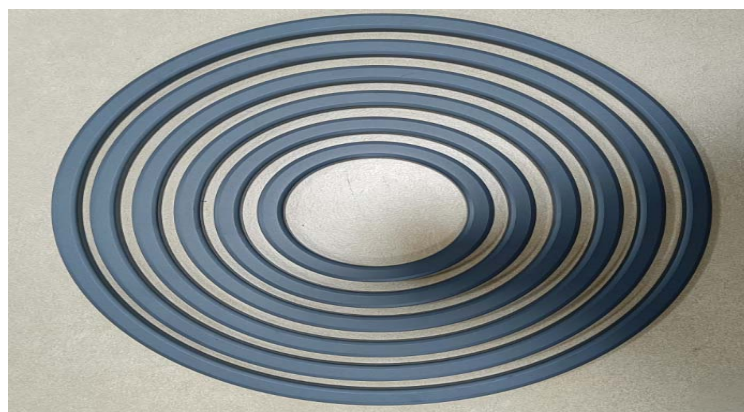


Рис. 4. Конструктивная схема профильного клапана

Регулировка работы системы бесступенчатого регулирования объема газа

В блоке возвратно-поступательного движения устройства блоки *A* и *B* оснащены системой бесступенчатого регулирования объема воздуха, а интеллектуальная система HRCS может обеспечивать бесступенчатое регулирование в диапазоне от 50 до 100 % нагрузки компрессора.

Когда нагрузка меньше 50 %, система HRCS работает с нагрузкой 50 %, а объем избыточного воздуха регулируется с помощью обратного клапана.

Когда нагрузка превышает 50 %, все обратные клапаны закрываются, и нагрузка на компрессор регулируется системой HRCS отдельно.

При сбое в работе системы HRCS она отключается и отправляет сигнал о неисправности в систему DCS, которая управляет обратным клапаном компрессора, увеличивая его открытие для регулирования расхода воздуха для работы компрессора на 100%-й полной нагрузке.

Система бесступенчатого регулирования объема газа обеспечивает удобство в эксплуатации и значительную экономию энергии. Однако, судя по анализу количества отказов клапанов, около 84 % от общего числа отказов клапанов приходится на агрегаты *A* и *B*. Таких агрегатов значительно больше, чем тех, у которых нет системы бесступенчатого регулирования объема газа.

В соответствии с производственными потребностями и требованиями по энергосбережению установки нагрузка компрессоров первой и второй ступеней системы бесступенчатого регулирования объема газа фиксируется и управляется автоматически через один обратный клапан и два обратных регулирующих клапана. Это не только позволяет достичь целей энергосбережения, но и уменьшает воздействие системы бесступенчатого регулирования объема газа на газовый клапан, тем самым снижая вероятность выхода из строя газового клапана компрессора и продлевая срок службы газового клапана [9].

Регулировка скорости впрыска масла в рабочем режиме

На ранних стадиях разборки неисправного клапана было обнаружено, что количество смазочного масла, впрыснутого в блок цилиндров, было слишком большим, а на крышке клапана были заметны явные остатки смазочного масла. При непрерывной работе компрессора клапанная пластина и седло клапана должны одновременно преодолевать усилие пружины, статическое давление среды и силу адсорбции жидкой пленки на уплотнительной поверхности. В момент подъема ударная нагрузка на пластину клапана увеличивается, что делает ее подверженной усталостному повреждению из-за чередующихся нагрузок во время многократных процессов открывания и закрывания. Если скорость впрыска масла слишком высока, это легко ускорит повреждение воздушного клапана. Необходимо обращать внимание на рабочую среду компрессора и технологические условия работы воздушного клапана, чтобы сжатая среда соответствовала технологическим требованиям и обеспечивала длительную работу агрегата и оборудования.

Установлено, что для стабильной работы агрегата скорость впрыска масла масляной форсункой агрегата, подаваемого в корпус цилиндра и поршень, сальник и шток, должна быть уменьшена с 8–10 до 4–6 капель/мин и четко указано в инструкции, а также визуализировано на трубопроводах (рис. 5).

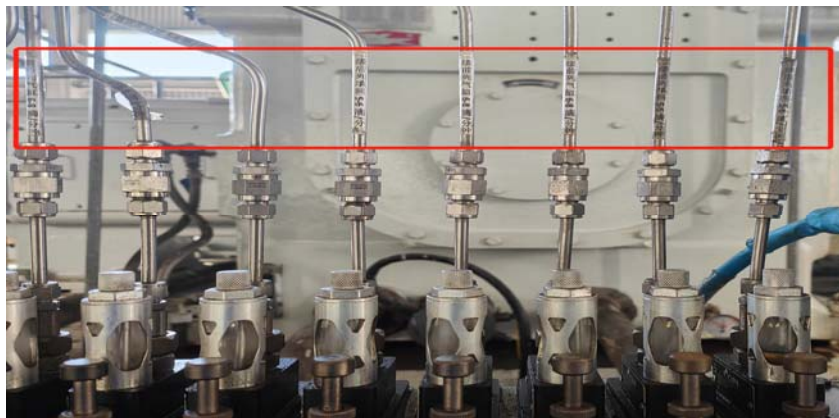


Рис. 5. Регулировка скорости впрыска масла и схема текстового напоминания для масляной форсунки

Заключение

Анализ влияния преобразования конструкции клапанной пластины после замены восьми выпускных воздушных плоских сетчатых клапанов на профильные кольцевые клапаны показал стабильность работы оборудования в общей сложности около 18240 часов. Воздушный клапан работает плавно, а разница температур на выходе первой и второй ступеней поршневой машины всегда находится в пределах 1°C . Воздушный клапан работает нормально, без шума, и общее рабочее состояние воздушного клапана хорошее.

Анализ эффективности работы и регулировки системы бесступенчатого регулирования объема газа показал, что фиксация нагрузки компрессоров первой и второй ступеней в системе бесступенчатого регулирования объема газа уменьшает воздействие газа на газовый клапан, повышает стабильность работы газового клапана и помогает выявить основную причину частых отказов газового клапана.

После запуска установки в течение определенного периода времени в таком рабочем режиме постепенно регулируется режим управления прибором системы бесступенчатого регулирования объема воздуха, чтобы добиться стабильной работы воздушного клапана при максимальной экономии энергии.

Рабочая кривая температуры выхлопных газов установки после замены клапана с кольцевой поверхностью и ручного управления нагрузкой системы бесступенчатого регулирования объема газа показана на рис. 6. Видно, что после преобразования срок службы воздушного клапана был увеличен с менее чем 20 дней до преобразования до более чем 3,5 месяцев, что значительно улучшает условия эксплуатации компрессора и повышает стабильность работы устройства. Установлено, что с 2022 по 2024 г. клапан усовершенствованной конструкции эксплуатировался в течение 18240 часов непрерывной работы (около 25 месяцев).

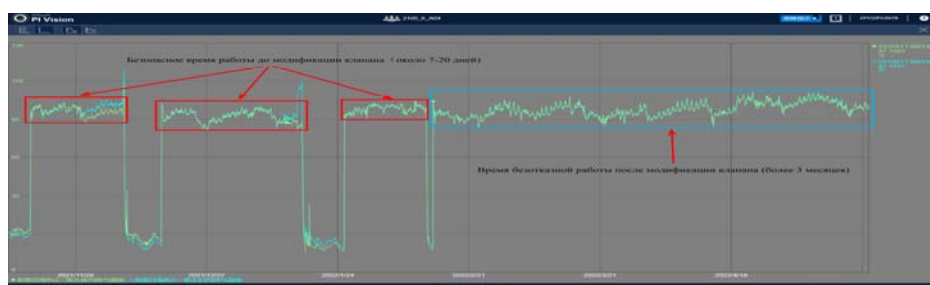


Рис. 6. Изменение температуры и срок эксплуатации клапана до и после модернизации

Анализ влияния регулирования скорости впрыска масла. После регулировки скорости подачи масла в поршневой узел устройства воздушного клапана до 4–6 капель/мин визуально не обнаружено видимых остатков смазочного масла, что свидетельствует о нормальной устойчивой работе агрегата.

Благодаря модификации пластины выпускного клапана возвратно-поступательной машины было улучшено напряженное состояние пластины клапана, повышена помехозащищенность конструкции пластины клапана, значительно увеличен срок службы пластины клапана, снижена частота технического обслуживания агрегата, а также повышена надежность конструкции пластины клапана и улучшена стабильность работы устройства. В то же время, благодаря строгому контролю скорости впрыска масла в форсунку и стабилизации нагрузки системы бесступенчатого регулирования объема газа, стабильность работы воздушного клапана была дополнительно повышена, что имеет положительное значение для увеличения срока службы воздушного клапана.

Литература

1. Пань, С. Анализ частых неисправностей газовых клапанов в поршневых компрессорах / С. Пань, Ю. Ань, Ю. Чжао // *China Equipment Engineering*. – 2021. – № 27 (10). – С. 68–69.
2. Чен, Г. Анализ неисправностей поршневых компрессоров и меры по их устранению / Г. Чен, Х. Цинь, Ю. Ли // *Инжиниринг оборудования*. – 2021. – № 23 (01). – С. 52–53.
3. Чжан, С. Исследование по диагностике неисправностей сетевого клапана поршневого компрессора / С. Чжан, И. Чжоу // *Станкостроение и гидравлика*. – 2020. – № 48 (20). – С. 176–179.
4. Юй, Я. Применение технологии мониторинга состояния при диагностике неисправностей центробежного компрессора BCL527/A / Я. Юй, А. Б. Невзорова, Г. В. Петришин // *Вестник Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. – 2022. – № 3 (90). – С. 5–12.
5. Чжан, Ч. Анализ и диагностика режимов отказа газовых клапанов в поршневых компрессорах / Ч. Чжан // *Химический менеджмент*. – 2020. – № 32 (05). – С. 142–143.
6. Ли, Ц. Анализ и диагностика режимов отказа газовых клапанов в поршневых компрессорах / Ц. Ли // *Сообщение о химическом проектировании*. – 2018. – № 44 (05). – С. 109.
7. Костюков, В. Н. Система мониторинга технического состояния поршневых компрессоров нефтеперерабатывающих производств / В. Н. Костюков, А. П. Науменко // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. – 2006. – № 10. – С. 38–47.
8. У, С. Тематическое исследование неисправности клапана поршневого компрессора / С. У // *Нефтяное и химическое оборудование*. – 2011. – № 14 (07). – С. 59–60.
9. Го, Р. Анализ и принятие мер по устранению неисправностей клапанов в поршневых компрессорах / Р. Го, С. Ли // *Coal Mining Machinery*. – 2009. – № 30 (12). – С. 226–228.
10. Хараев, А. М. Полиэфирэфиркетоны: синтез, свойства, применение (обзор) / А. М. Хараев, Р. Ч. Бажева // *Пластические массы*. – 2018. – № 7/8. – С. 15–23.

References

1. Pan X., An Y., Zhao Y. Analysis of common faults of gas valves in reciprocating compressors. *China Equipment Engineering*, 2021, no. 27 (10), pp. 68–69 (in Russian).
2. Chen G., Qin H., Li Y. Fault. Analysis of piston compressor faults and measures to eliminate them. *Inzhiniring oborudovaniya*, 2021, no. 23 (01), pp. 52–53 (in Russian).
3. Zhang X., Zhou Y. Research on diagnostics of failures of the network valve of a piston compressor. *Stankostroenie i gidravlika*, 2020, no. 48 (20), pp. 176–179 (in Russian).

4. Yu Y., Nevzorova A. B., Petrishin G. V. Application of condition monitoring technology in fault diagnosis of BCL527/A centrifugal compressor. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2022, no. 3, pp. 5–12 (in Russian).
5. Zhang C. Analysis and diagnostics of failure modes of gas valves in piston compressors. *Khimicheskii menedzhment*, 2020, no. 32 (05), pp. 142–143 (in Russian).
6. Li J. Analysis and diagnostics of failure modes of gas valves in piston compressors. *Soobshchenie o khimicheskoy proektirovani*, 2018, no. 44 (05), pp. 109 (in Russian).
7. Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Monitoring system for the technical condition of piston compressors in oil refineries. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt*, 2006, no. 10, pp. 38–47 (in Russian).
8. Wu X. Case study of piston compressor valve failure. *Neftyanoe i khimicheskoe oborudovanie*, 2011, no. 14 (07), pp. 59–60 (in Russian).
9. Guo R., Li S. Analysis and troubleshooting of valves in piston compressors. *Coal Mining Machinery*, 2009, no. 30 (12), pp. 226–228 (in Russian).
10. Kharaev A. M., Bazheva R. Ch. Polyetheretherketones: synthesis, properties, applications (review). *Plasticheskie massy = Plasticheskie massy*, 2018, no. 7–8, pp. 15–23 (in Russian).

Поступила 03.09.2025 г.