

УДК 621.671.22
DOI 10.17513/snt.40435

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ТОРЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Гайдуков А.А.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,
e-mail: aleksei.gaidukov@mail.ru

Цель исследования – проведение анализа надежности торцевых уплотнений посредством сравнения эксплуатационных показателей и определение наиболее уязвимых материалов колец пар трения торцевого уплотнения на примере насосов нефтегазовой промышленности. Торцевые уплотнения имеют широкое применение в машиностроительной отрасли и используются в металлообрабатывающем оборудовании, подъемно-транспортных механизмах, двигателестроении, нефтегазовом оборудовании. Статья посвящена исследованию причин выхода из строя торцевых уплотнений, применяемых в машиностроении для герметизации вращающихся элементов агрегатов. Оценивается важность применения торцевых уплотнений и рассматриваются факторы, способствующие преждевременному выходу из строя. Приводятся статистика отказов насосных агрегатов, которая позволяет говорить о необходимости поиска методов повышения их надежности и долговечности. Выполнен сравнительный анализ заявленных характеристик и фактических показателей образцов торцевых уплотнений различных моделей, бывших в эксплуатации, что позволило сделать вывод об их износостойкости. Проведен анализ комбинаций применяемых колец пар трения, который показал, что в условиях эксплуатации агрессивных сред под давлением пара графит + карбид кремния сохраняет свою актуальность, однако требует дополнительной обработки поверхностей. Комбинация пары трения уголь + керамика, карбид кремния является более совершенной конструкцией, позволяющей снизить износ от сил трения, возникающих при эксплуатации. Таким образом, применение карбидокремниевой керамики позволяет увеличить межремонтный интервал агрегата в части необходимости замены торцевого уплотнения из-за износа колец трения.

Ключевые слова: машиностроение, технологическое оборудование, надежность оборудования, герметизация вращающихся узлов машин, торцевые уплотнения, износостойкость

FAILURE ANALYSIS OF MECHANICAL SEALS

Gaydukov A.A.

Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: aleksei.gaidukov@mail.ru

The purpose of this study is to analyze the reliability of mechanical seals by comparing operational performance and identifying the most vulnerable materials for seal face pairs, using pumps in the oil and gas industry as an example. Mechanical seals are widely used in mechanical engineering and can be found in metalworking equipment, lifting and transport mechanisms, engine manufacturing, and oil and gas equipment. This article investigates the causes of mechanical seal failures in machinery designed to seal rotating components of industrial units. The importance of mechanical seals is assessed, and factors contributing to their premature failure are examined. Statistics on pump unit failures are presented, highlighting the need to develop methods for improving their reliability and durability. A comparative analysis of declared characteristics and actual performance data of various mechanical seal models after operation was conducted, allowing conclusions to be drawn about their wear resistance. An analysis of friction pair combinations revealed that under high-pressure and aggressive media conditions, the graphite carbon-ceramic pair remains relevant but requires additional surface treatment. The carbon-ceramic friction pair proves to be a more advanced design, reducing wear caused by frictional forces during operation. Thus, the use of silicon carbide ceramics extends the maintenance interval of equipment by reducing the need for mechanical seal replacement due to wear on the friction rings.

Keywords: mechanical engineering, industrial equipment, equipment reliability, mechanical seals, sealing of rotating machinery components, wear resistance

Введение

В современном машиностроении торцевые уплотнения занимают особое положение как критически важные элементы, обеспечивающие герметичность и надежность вращающихся агрегатов. Однако в ряде ответственных систем именно они становятся основным источником отказов, приводя к существенным эксплуатационным затратам и длительным простоям оборудования. При детальном рассмотрении центробежных и шестеренных насосов, широко применяемых в нефтегазовой, химической

и энергетической отраслях, необходимо подчеркнуть, что торцевые уплотнения в них подвергаются экстремальным нагрузкам, обусловленным комплексом факторов [1, 2]. В частности, в магистральных нефтяных насосах наблюдается ускоренный износ пар трения, что объясняется воздействием абразивных примесей и повышенных температур [3, 4]. Нефтегазовая отрасль является одной из основополагающих в России, поэтому научно-технические вопросы, связанные с ее развитием, требуют инновационных решений в области проектирования

машин и механизмов [5, 6]. Нефтегазовая отрасль строится на работе агрегатов, обеспечивающих добычу и транспортировку нефти. Одним из таких ключевых устройств является магистральный насосный агрегат (МНА), предназначенный для магистрального транспорта нефти. Опираясь на накопленные данные эксплуатации, можно дать объективную оценку качеству и надежности оборудования. Ключевым показателем надежности насосов является их бесперебойная работа, то есть отсутствие отказов, таких как внезапные остановки, неисправность двигателя, дефекты ротора, повреждения торцевых уплотнений и утечки нефти. Основная функция торцевого уплотнения заключается в герметизации внутренней полости агрегата и предотвращении утечки среды. Задача осложняется тем, что необходимо учитывать работу насоса под действием динамических нагрузок и вращающихся масс. К примеру, в насосах нефтегазовой промышленности торцевое уплотнение устанавливается на концах ротора и, следовательно, воспринимает на себя все негативные факторы эксплуатации. Эти кольца изготавливаются из высокопрочных материалов, способных выдерживать постоянное трение, и устанавливаются в паре для обеспечения герметичности в зоне контакта [7]. В настоящее время надежность магистральных насосов продолжает оставаться на недостаточном высоком уровне. Основной причиной отказов магистральных насосных агрегатов выступают дефекты торцевых уплотнений, которые могут быть обусловлены рядом факторов, включая повышенный износ колец пары трения, локальный перегрев уплотнения, технологические погрешности при изготовлении и сборке компонентов торцевого уплотнения, а также отклонения от регламентированных условий эксплуатации [8]. Анализ отказов магистральных насосов позволяет выделить следующие ключевые причины от общего числа отказов: торцевые уплотнения – 30%; подшипниковые узлы – 15,5%; человеческий фактор – 12%; неисправности маслосистемы – 9,3%; повышенная вибрация – 4,3%; дефекты системы утечек и разгрузки – 3,9%; прочие факторы – 24,6%. Несмотря на то, что технология производства таких колец пары трения считается значительным достижением в машиностроении, статистика отказов свидетельствует о серьезной проблеме: около 30% отказов связаны именно с торцевыми уплотнениями [9].

Цель исследования – проведение анализа надежности торцевых уплотнений посредством сравнения эксплуатационных показателей и определение наиболее уязви-

мых материалов колец пары трения торцевого уплотнения на примере насосов нефтегазовой промышленности.

Материалы и методы исследования

Исследование заключалось в проведении эксплуатационного мониторинга (наработка до отказа), постэксплуатационной оценки (разборка, визуальная оценка) и сравнительного анализа материалов и конструкций торцевых уплотнений. В ходе проведенных исследований основными критериями оценки работоспособности торцевых уплотнений служили следующие параметры: фактический срок службы относительно заявленных производителем значений, степень износа контактных поверхностей, качественный и количественный анализ поверхностных дефектов (включая риски, сколы и коррозионные повреждения), а также идентификация факторов, приводящих к преждевременному отказу (абразивный износ, эксплуатационные перегрузки, коррозионные процессы).

Исследования выполнялись на примере следующих моделей:

1. УТ 156x216 – одинарное механическое уплотнение пружинного типа, предназначенное для использования в центробежных насосах.

2. JohnCrane – представляют собой двойные картриджные уплотнения премиум-класса. Их конструкция включает два независимых уплотнительных узла, разделенных барьерной камерой, в которую подается затворная жидкость под давлением. Каждый узел состоит из пары трения (обычно карбид кремния/графит или керамика/углерод), пружинного блока и вторичных уплотнений из фторкаучука или перфторалкана.

3. УТК 120К – конструктивно состоит из графитового подвижного кольца и неподвижного кольца из карбида вольфрама.

4. УТК 124К – отличается использованием пары трения графит-карбид кремния вместо карбида вольфрама, что повышает износостойкость.

5. УТ 124x186-К – пара трения из графита и карбида кремния с лазерной обработкой поверхности для создания микроканалов смазки.

Материалы пары трения: графит + карбид кремния. Указанные торцевые уплотнения устанавливались в магистральные насосные агрегаты одного нефтепровода на разных насосных станциях.

Результаты исследования и их обсуждение

УТ 156x216-К: фактическая наработка до отказа составила 24000 ч при заявлен-

ных производителем 25000 ч, что составляет 96%. На кольцах трения имеются такие дефекты, как вкрапления и риски, суммарно составляющие не более 10% от всей площади контактной поверхности.

JohnCrane: фактическая наработка до отказа составила 25565 ч при заявленных производителем 30000 ч, что составляет 85%. На кольцах трения имеются такие дефекты, как истирание поверхности, что уменьшает толщину кольца.

УТК 120К: фактическая наработка до отказа составила 11950 ч при заявленных производителем 15000 ч, что составляет 80%. На корпусе уплотнения имеются следы коррозии, что говорит о слабой антикоррозионной обработке. Материал трения имеет естественное истирание поверхности с наличием рисков и вкраплений, возможно из-за влияния абразивных частиц. Таким образом имеется нарушение геометрии контактной поверхности.

УТК 124К: фактическая наработка до отказа составила 12100 ч при заявленных производителем 20000 ч, что составляет 60%. Кольца трения имеют естественное истирание поверхности. Фиксируются риски, вкрапления, множественные сколы на 70% поверхности кольца.

УТ 124x186-К: фактическая наработка до отказа составила 8600 ч при заявленных производителем 20000 ч, что составляет 43%. Кольца трения имеют чрезмерное истирание поверхности. Фиксируются вкрапления и сколы на 20% поверхности кольца. Оценивались пары трения, представленные на рис. 1.

На основании проведенного анализа эксплуатационных характеристик различных моделей торцевых уплотнений можно сделать комплексный вывод о соответствии заявленных параметров реальным показателям надежности. Результаты анализа пяти образцов торцевых уплотнений сведены в таблицу.



Рис. 1. Элементы торцевых уплотнений: УТ 156x216-К, JohnCrane, УТК 120К, УТК 124К, УТ 124x186-К
Источник: составлено авторами

Сводные данные опытных образцов торцевых уплотнений

Параметр	Модель торцевого уплотнения				
	УТ 156x216-К	JohnCrane	УТК 120К	УТК 124К	УТ 124x186-К
Тип уплотнения	Одинарное, пружинное	Двойное, картриджное	Одинарное, пружинное	Одинарное, пружинное	Одинарное, пружинное
Рабочее давление, МПа (бар)	До 2,5 (25)	До 4,0 (40)	До 1,6 (16)	До 2,5 (25)	До 2,5 (25)
Материал пар трения	графит + карбид кремния (SiC)	уголь + керамика, карбид кремния (SiC)	графит + карбид вольфрама (WC)	графит + карбид кремния (SiC)	графит + карбид кремния (SiC)
Срок службы, ч	25000	30000	15000	20000	20000
Фактическая наработка до отказа, ч	20555	25565	11950	12100	8600
Фактическая наработка относительно паспортных данных	82 %	85 %	80 %	60 %	43 %

Источник: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Наилучшие результаты демонстрирует модель JohnCrane, которая при самых жестких условиях эксплуатации (давление до 4,0 МПа, температурный диапазон -50...+250 °С и скорость вращения 25 м/с) сохраняет 85% от заявленного ресурса, что свидетельствует о высокой эффективности ее двойной картриджной конструкции и оптимально подобранной комбинации материалов (уголь + керамика / карбид кремния). Модель УТ 156x216-К, несмотря на более простую одинарную пружинную конструкцию, показывает сопоставимый уровень надежности (82% от паспортного срока), что подтверждает удачность выбора пары трения графит + карбид кремния для работы в стандартных условиях. Низкие результаты демонстрируют модели

УТК 124К и УТ 124x186-К, чья фактическая наработка составляет лишь 60 и 43% соответственно от заявленных значений, что может быть обусловлено как недостаточной оптимизацией конструкции для заявленных параметров, так и возможным отклонением реальных условий эксплуатации от расчетных. Особого внимания заслуживает тот факт, что все модели с парой трения графит + карбид кремния, за исключением JohnCrane, не достигают заявленного ресурса, тогда как модель УТК 120К с парой графит + карбид вольфрама демонстрирует относительно стабильные 80% от паспортного срока, но при этом имеет достаточно ограниченный заявленный срок эксплуатации по сравнению с другими моделями.

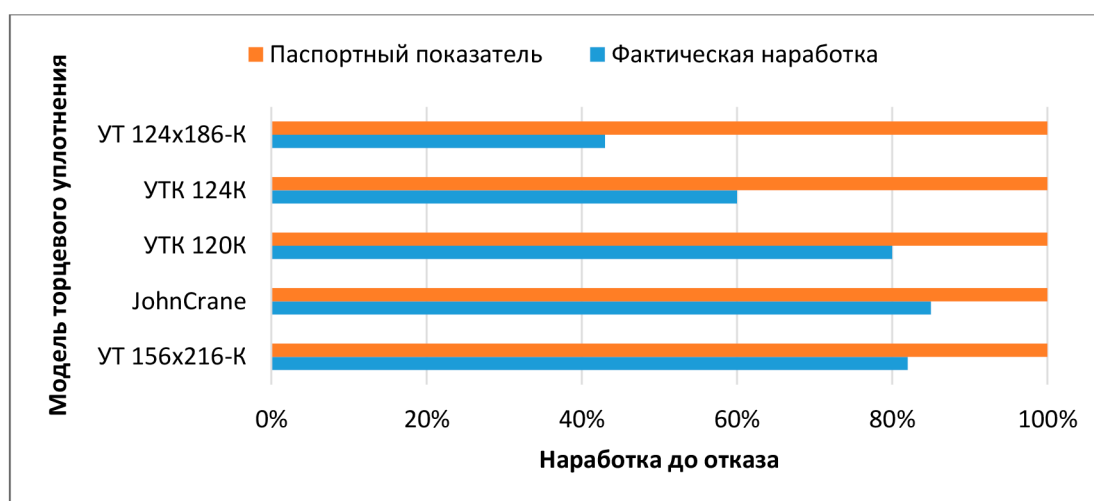


Рис. 2. Сравнение показателей фактической наработки с паспортными значениями образцов торцевых уплотнений в процентном выражении

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

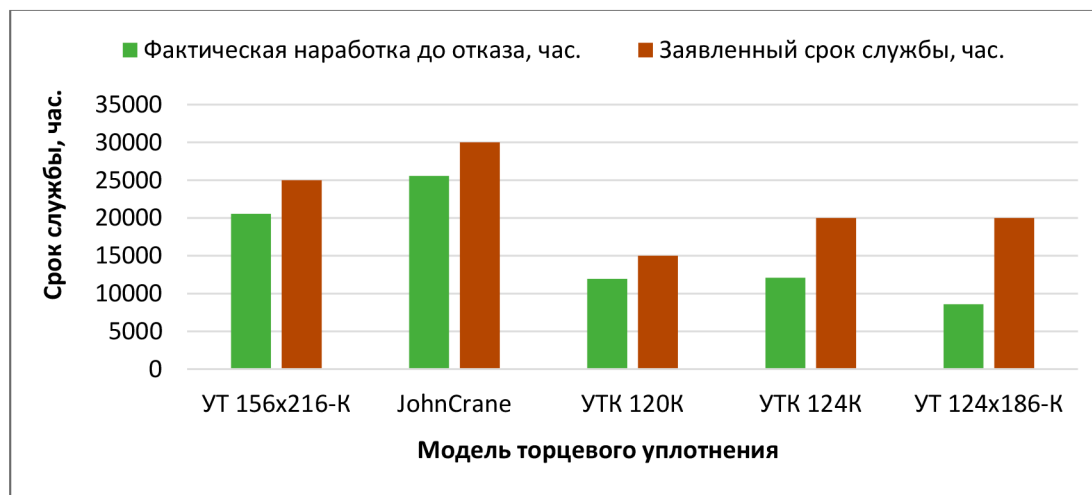


Рис. 3. Сравнение паспортного и фактического сроков службы торцевых уплотнений по наработке (часы)

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Комплексный анализ эксплуатационных характеристик торцевых уплотнений различных моделей выявил существенный разрыв между паспортными и фактическими показателями наработки (рис. 2, 3). Повышение долговечности уплотнительных систем возможно лишь при системном подходе, учитывающем как конструкционные особенности, так и условия эксплуатации оборудования. Строгое соблюдение регламентированных значений давления, температуры и скорости вращения позволяет существенно продлить ресурс уплотнений. Наиболее перспективным направлением представляется использование усовершенствованных пар трения [10, 11]. Для тяжелых условий эксплуатации оптимальной является комбинация карбида кремния с углеродными материалами [12, 13]. В стандартных условиях сохраняет актуальность пара графит + карбид кремния, однако требует дополнительной обработки поверхностей [14, 15]. Использование карбида вольфрама в ряде случаев показывает меньшую эффективность. Переход на двойные картриджные уплотнения позволяет добиться более равномерного распределения нагрузок и улучшить герметичность системы. Существенное значение имеет качество монтажа и технического обслуживания. Точность центровки и соблюдение допусков при установке напрямую влияют на долговечность уплотнений. Внедрение лазерных методов центровки и регулярный мониторинг технического состояния позволяют минимизировать вибрации – один из основных факторов преждевременного выхода из строя. Особого внимания заслу-

живает вопрос анализа причин отказов. Проведение микроскопических исследований изношенных поверхностей и механических испытаний позволяет точно определить механизмы износа и разработать мероприятия по их устранению. Для моделей с наиболее низкими показателями наработки (УТК 124К, УТ 124x186-K) такой анализ представляется особенно актуальным. Торцевые уплотнения остаются наиболее уязвимыми узлами магистрального насосного агрегата, что требует дальнейшего совершенствования их конструкции.

Выводы

1. Выявлен существенный разрыв между паспортными данными производителей и фактической наработкой уплотнений (от 43 до 96%).

2. Подтверждена эффективность двойных картриджных уплотнений (JohnCrane – 85% ресурса в тяжелых условиях).

3. Кольца трения из карбидокремниевой керамики являются перспективным материалом. Дальнейшие исследования в этом направлении могли бы быть сосредоточены на разработке нового композитного материала на основе карбидокремниевой керамики.

Данное исследование имеет высокую практическую и научную значимость для инженерной практики, для машиностроительной промышленности, разработки новых материалов и экономической эффективности оборудования. Работа имеет прикладное значение для машиностроительной промышленности, способствуя повышению надежности и экономической эффективности оборудования.

Список литературы

1. Душко О.В., Пушкарев Д.О. Износостойкие керамические торцевые уплотнения для нефтехимической промышленности // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сборник статей Международной научно-технической конференции (Волгоград – Волжский, 01–31 января 2004 г.) / Под общ. ред. В.М. Шумячера. Волгоград–Волжский: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2004. С. 61–63. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22640305> (дата обращения: 28.05.2025). EDN: TBLJTP.
2. Душко О.В. Повышение износостойкости деталей объемных гидроагрегатов путем применения керамических материалов // Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство: материалы Международной конференции, посвященной 60-летию образования вуза: в 2 ч. (Волгоград, 18–19 сентября 2012 г.). / Редколлегия: С.Ю. Калашников, А.Н. Богомолов, П.П. Олейников, Л.Ю. Главатских, Н.В. Мензелинцева, О.В. Максимчук, С.Л. Туманов, А.В. Жиделёв. Ч. I. Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. С. 100–107. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vgasu.ru/attachments/sb-mk-noags-1.pdf> (дата обращения: 28.05.2025). EDN: RUFADJ.
3. Ахметзянов Л.М., Гарипов И.Н. Увеличение межремонтного периода динамических насосов для перекачки нефтепродуктов // Экспозиция Нефть Газ. 2018. № 7 (67). С. 56–58. EDN: YNRFBR. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36424541_25815865.pdf (дата обращения: 28.05.2025).
4. Кравченко И.Н., Петров С.В. Современные материалы для уплотнительных пар насосного оборудования // Нефтяное хозяйство. 2017. № 5. С. 112–115. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-5-112-115.
5. Рыжов В.В. Триботехнические характеристики керамических материалов на основе карбида кремния // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 2. С. 178–185. DOI: 10.3103/S1068366616020114.
6. Душко О.В., Уманский А.П., Пушкарев Д.О. Композиционные износостойкие материалы на основе карбида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 2005. С. 22–24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26274110> (дата обращения: 28.05.2025).
7. Карманов А.В., Росляков Д.А. Оценка эксплуатационных показателей надежности магистральных насосов магистральных нефтепродуктопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 12. С. 41–45. EDN: OSVSFN.
8. Варнаков Д.В., Неваев А.С., Сотников С.П. Анализ отказов и повышение надежности нефтепродуктопровода // Modern Science. 2021. № 1–2. С. 440–444. EDN: XLBUPN.
9. Катков Д.С., Наумова О.В., Спиридонова Е.В. Повышение надежности трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов увеличением ресурса трибосопряжений насосного оборудования // Вестник Евразийской науки. 2020. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/04SAVN220.pdf> (дата обращения: 28.05.2025).
10. Кузин В.В., Фёдоров С.Ю., Григорьев С.Н. Технологическое обеспечение качества кромок колец пары трения из карбида кремния для торцевых уплотнений насосов // Новые огнеупоры. 2017. № 11. С. 65–69. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-11-65-69.
11. Душко О.В., Перфилов В.А., Ярошик В.В., Землянушнов Д.Ю. Определение свойств изделий из высокотвердой керамики для нефтегазовой промышленности // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2016. № 6. С. 28–32. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26135715_59145638.pdf (дата обращения: 28.05.2025). EDN: VZYDAB.
12. Душко О.В., Перфилов В.А., Буров А.М., Ярошик В.В. Повышение износостойкости деталей нефтегазового оборудования, изготовленных из композиционных материалов на основе SiC-AL₂O₃ и SiC-AL₂O₃-ALN // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. № 1. С. 30–32. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27648663_66643807.pdf (дата обращения: 28.05.2025). EDN: XHAXXD.
13. Кузин В.В., Григорьев С.Н., Фёдоров С.Ю. Взаимосвязь структуры Al₂O₃-керамики с механизмом формирования поверхностного слоя заготовок при алмазном шлифовании // Новые огнеупоры. 2019. № 1. С. 65–68. DOI: 10.17073/1683-4518-2019-1-65-68.
14. Кузин В.В., Портной Н.Р., Фёдоров С.Ю., Мороз В.И. Влияние воздушно-абразивной обработки на эксплуатационные характеристики изделий из оксидно-карбидной керамики // Новые огнеупоры. 2015. № 1 (9). С. 62–67. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-9-62-67.
15. Бесиса Д., Эвайс Э., Ахмед Я., Элхосини Ф., Фенд Т., Кузнецов Д.В. Влияние атмосферы спекания на производство композитов из SiC/ALN-КЕРАМИКИ // Новые огнеупоры. 2017. № 9. С. 54–59. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-9-54-59.