

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-90-95>

УДК 532.5:621.65:536.3



АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

С.Н. Редников[✉], Т.И. Матвеева, Д.М. Бенин, Е.Н. Ахмедьянова, А.С. Матвеев

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия
Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова; 127434, Москва, ул. Б. Академическая, 44, Россия

Аннотация. Разработка методик первичного диагностирования насосных агрегатов остается актуальной задачей в связи с низкими затратами на оценку состояния оборудования. Целью исследований является анализ результатов постремонтного контроля механической и электрической части гидроагрегатов с использованием термограмм. При проведении исследований использовался тестовый насосный агрегат с контролируемыми дефектами рабочего колеса, муфты, подшипниковыми и уплотнительными элементами. Оценивались минимальные требования к диагностическому оборудованию. Проводился анализ данных как при наличии дефектов, так и после их устранения. Представлены результаты анализа термограмм подшипниковых узлов центробежных насосов и приводных электродвигателей. Указывается, что для эффективного анализа оборудования минимальная разрешающая способность тепловизионной техники должна составлять не более 0,1 град. Это позволяет эффективно проводить анализ постремонтных состояний механической части.

Ключевые слова: тепловизионная диагностика, термограмма, механические узлы, насосные агрегаты

Формат цитирования: Редников С.Н., Матвеева Т.И., Бенин Д.М., Ахмедьянова Е.Н., Матвеев А.С. Анализ эффективности применения тепловизионных систем для оценки технического состояния насосных агрегатов // Природообустройство. 2024. № 2. С. 90-95. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-90-95>

Original article

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF USING THERMAL IMAGING SYSTEMS TO ASSESS THE TECHNICAL CONDITION OF PUMPING UNITS

S.N. Rednikov[✉], T.I. Matveeva, D.M. Benin, E.N. Akhmedyanova, A.S. Matveev

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of land reclamation, water management and construction named after A.N. Kostyakov; 44, Bolshaya Akademicheskaya, Moscow, 127434, Russia

Abstract. The development of methods for the primary diagnosis of pumping units remains an urgent task due to the low cost of assessing the condition of the equipment. The purpose of the study is to analyze the results of post-repair control of the mechanical and electrical parts of hydraulic units using thermograms. During the study, a test pumping unit with controlled defects of the impeller, coupling, bearing and sealing elements was used. The minimum requirements for diagnostic equipment were evaluated. The data was analyzed both in the presence of defects and after their elimination. The article presents the results of the analysis of thermograms of bearing assemblies of centrifugal pumps and drive electric motors. It is indicated that for an effective analysis of equipment, the minimum resolution of thermal imaging equipment should be no more than 0.1 degrees, which makes it possible to effectively analyze the post-repair conditions of the mechanical part.

Keywords: thermal imaging diagnostics, thermogram, mechanical components, pumping units

Format of citation: Rednikov S.N., Matveeva T.I., Benin D.M., Akhmedyanova E.N., Matveev A.S. Analysis of the effectiveness of using thermal imaging systems to assessing the technical condition of pumping units // Prirodobustrojstvo. 2024. № 2. P. 90-95. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-90-95>

Введение. Тепловизионная диагностика – метод, способствующий быстрому выявлению скрытых дефектов в гидрооборудовании без применения разрушающих воздействий. В основу метода входит регистрация теплового поля на поверхности гидрооборудования, тем самым

выявляя отклонения от нормы в контрольных точках, после анализа и оценки которых делается вывод об исправности гидросистемы в целом. Данный вид диагностики универсален, достоверен и безопасен как для самого оборудования, так и для персонала, проводящего исследование. Достоверность результатов, полученных от термограмм, достаточно велика, и иногда получение достоверного результата не предоставляется возможным другим путем или методом.

Одной из проблем диагностики элементов гидротехнических сооружений является идентификация начальной стадии до отказного разрушения. Наиболее простым методом первичной оценки состояния является анализ термограмм поверхности объектов. Традиционно тепловизионная диагностика осуществляется при сравнении термограмм поверхности объектов с эталоном, предыдущим состоянием или между аналогичными техническими объектами (рис. 1).

По результатам диагностики составляется карта выявленных дефектов и повреждений, даются рекомендации по их устранению.

Анализируя опыт оценки состояния насосных агрегатов на промышленных и гидротехнических объектах страны, можно отметить, что до сих пор находят широкое применение методы оценки состояния оборудования, когда первичная информация воспринимается органами чувств обслуживающего персонала по нагреву, шуму, запаху [1-3]. Особенно часто такой подход используется при оценке состояния вспомогательного оборудования, работающего на отказ. При наличии

служб надежности на предприятии находят применение методики виброакустического контроля, но применяются они, как правило, по заявкам или при выявлении предаварийных ситуаций. Использование этого вида оборудования для первичной оценки состояния агрегатов затруднено необходимостью квалифицированно проводить замеры и трактовать результаты обследования. Следовательно, возникает задача разработки и апробации методики комплексной диагностики, пригодной при первичной оценке состояния насосного оборудования.

Если при диагностике первичных неисправностей механической части гидравлических аппаратов наибольший эффект достигается в случае использования комбинированных методов диагностики, то при анализе пост-ремонтных состояний использование комбинированных методов зачастую является избыточным [4, 5]. Наибольший экономический эффект при наименьших временных затратах, как показали исследования, дает использование тепловизионной диагностики. Наиболее эффективным в этом случае является контроль состояния подшипниковых узлов (опор качания) и электротехнической контактной части.

Цель исследований: анализ результатов постремонтного контроля механической и электрической части гидроагрегатов с использованием термограмм.

Методы и материалы исследований. При проведении эксперимента был задействован центробежный насос типа «Д» с трехфазным

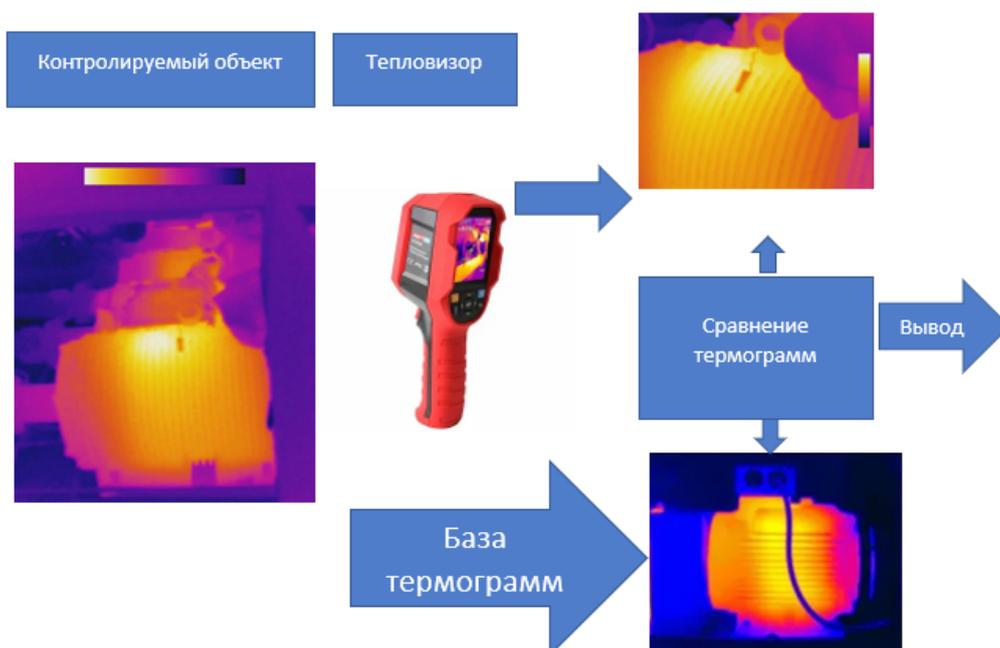


Рис. 1. Диагностика методом сравнения термограмм

Fig. 1. Diagnostics by a method of comparing thermograms

электродвигателем, с фиксированной частотой вращения.

Общеизвестным фактом является то, что только при качественной диагностике еще действующего оборудования в предремонтный период можно произвести оценку и закупку комплектующих для восстановления ресурса агрегата и предотвратить повышение стоимости ремонта в результате сопутствующих отказов элементов. Сложность составляет и тот факт, что остаточный ресурс насосных агрегатов зависит от множества внешних факторов – таких, как уровень и фракционный состав загрязнителей перекачиваемых сред, состояние систем охлаждения, качество подаваемой на электродвигатель электроэнергии как по частоте, так и по напряжению, состав и характер загрязнения воздушной среды в зоне установки агрегатов.

Чаще всего проблемы связаны с состоянием сальников и торцевых уплотнений. Высокий уровень герметичности используемых контактных или бесконтактных уплотнений обеспечивает длительную и плавную работу подшипниковых узлов. Вращение вала с биениями, вызываемыми дисбалансом статического и динамического типов, оказывает чрезмерную нагрузку на функционирование уплотняющих узлов, что уменьшает срок их службы [6, 7]. Причинами возникновения биений могут стать нарушение центрирования оси вращения вала двигателя и насоса, осевое смещение, инородные тела в крыльчатке или ее квантанционный износ, плохое состояние подшипников. Подшипники необходимо регулярно обслуживать. Неисправность подшипников может привести к повреждению иных элементов оборудования. При внезапном повышении расхода электроэнергии, как правило, требуется ремонт электродвигателя насоса. Чтобы устранить неисправность, сначала нужно выяснить причину ее возникновения путем диагностирования, и только тогда можно выполнить качественный ремонт. Не менее важной является проверка состояния оборудования после ремонтных воздействий.

Достаточно просто можно выявить неисправности, связанные с повреждением обмоток электродвигателей насосных агрегатов, а также проблемы контактных зон распределительного оборудования. Тепловизионный контроль широко применяется персоналом, контролирующим электротехническое оборудование, при выявлении межвитковых замыканий, перегрузок катушек магнитных систем управления, ослабших контактных соединений, разбега фаз. Одной из проблем при этом является необходимость достаточно большого опыта и знания объекта

диагностом. Кроме того, в более сложных случаях один лишь анализ термограмм может затруднить выявление причин наступления неисправного состояния. С применением перекрестных методов диагностики и автоматизированного анализа термограмм поверхности объектов с использованием систем искусственного интеллекта становится возможным разработка полуавтоматизированных, а в перспективе – автоматизированных систем оценки состояния объектов.

В работе [1] авторами была произведена оценка состояния насоса до его аварии, выявлены зоны с аномальным нагревом опор подшипника, элементов компенсирующей муфты и сальниковой набивки (рис. 2). Как следствие этого, происходит расцентровка вала двигателя насоса и возникает необходимость замены смазки подшипниковых узлов.

В исследованиях использовался переносной тепловизор UNI 260В чувствительностью 0,1 град., с разрешением матрицы 256*192, относящийся к тепловизорам начального уровня с неохлаждаемой матрицей. Температурный диапазон – от -15°C до $\sim +550^{\circ}\text{C}$. Особенностью прибора является автофокусировка.

Результаты и их обсуждение. После проведения ремонтных работ по смазке и центровке была составлена термограмма, представленная рисунке 3.

На термограммах хорошо заметен разный характер зон нагрева компенсирующей муфты до процедуры центровки и после нее. Также можно заметить различие в зонах повышенных температур исправного подшипника при наличии достаточного количества смазки и при ее отсутствии. При отсутствии смазки

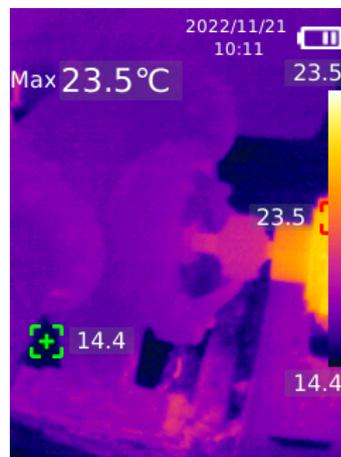


Рис. 2. Термограмма подшипника до проведения работ с выявленными дефектами смазки
Fig. 2. Thermogram of the bearing prior to work with detected lubrication defects

на неповрежденных дорожках качения наблюдается повышенная температура наружной обоймы и прилегающей зоны вала, частично прогреваемой вследствие трения в уплотняющем элементе.

На рисунке 4 представлены термограммы подшипника до ремонтного обслуживания

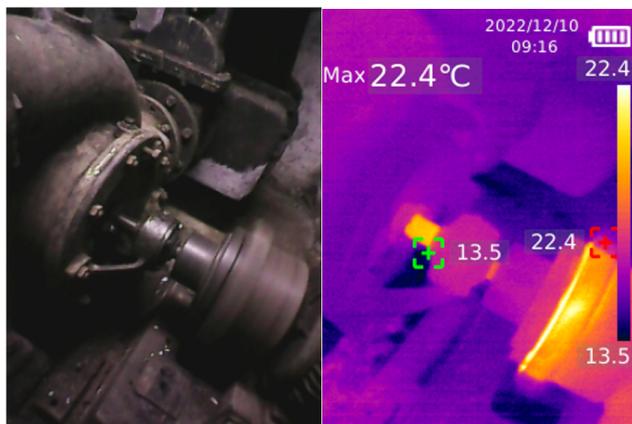


Рис. 3. Подшипник насоса и термограмма после ремонта

Fig. 3. Pump bearing and thermogram after repair

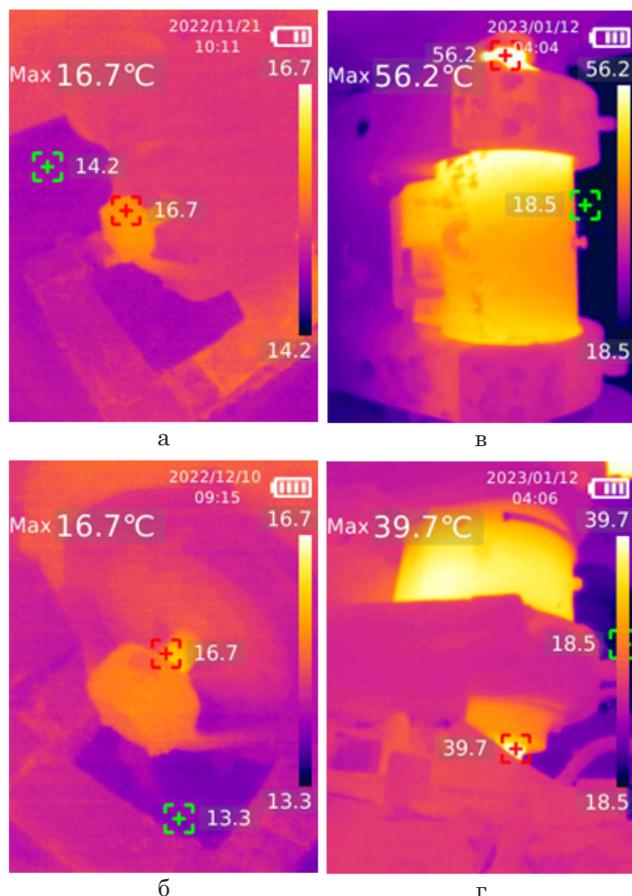


Рис. 4. Термограммы:

подшипника до обслуживания (а) и после него (б); подшипника качения до смазки (в) и после нее (г)

Fig. 4. Thermograms of:

bearing before (a) and after (b) service; rolling bearing before (B) and after (D) lubrication

и смазки (а) и после него (б). На термограмме подшипника после проведения обслуживания хорошо заметны смещение зоны тепловыделения в зону внутренней обоймы и падение температуры наружной обоймы и корпуса.

Не менее эффективно и выявление начального состояния дефектов обмоток [3, 8], электроизоляции проводов [9] и элементов электроавтоматики [10, 11]. На рисунке 5 приведены примеры выявления дефектов соединения силовой обмотки в распределительном шкафу и в клеммной коробке электродвигателя соответственно.

Представленный метод термограмм позволяет выявлять ослабленные контактные группы, предварительно оценивать возможность «смещения фаз» и межвитковые замыкания [3, 12, 13].

В простейших случаях однофакторных неисправностей, используя 600 эпох обучения, удалось получить ошибку распознавания 0.401 для одноветвленной сети. Но при наличии комбинированных неисправностей ошибка распознавания возрастала до 0.783, что является неприемлемым. Это показывает, что целесообразно использовать многоветвенные модели, анализирующие не только термограммы поверхности объектов, но и, как минимум, виброакустические сигналы.

Метод оценки объемного распределения температурных аномалий целесообразно применять при выявлении температурной аномалии на термограммах, используя для этого интеллектуальную измерительную систему как инструмент идентификации растровых термограмм при одновременном формировании граничных условий для решения задачи объемного распределения температур.

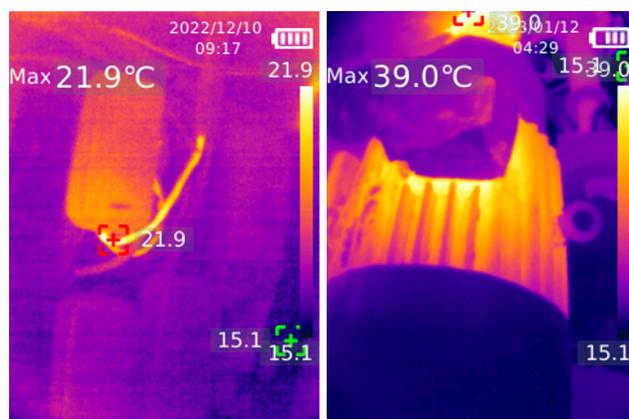


Рис. 5. Зона повышенного нагрева проводников и клеммной коробки электродвигателя

Fig. 5. The zone of increased heating of the conductors and the terminal box of the electric motor

Обработку термограмм осуществляли с использованием нейронной сети. Обучение сети осуществлялось методом коррекцией весовых коэффициентов с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. Использовались эталонные и экспериментальные данные, снимаемые с объектов с заранее известными неисправностями. Применяли 500 эталонных и 550 экспериментальных термограмм. Термограммы были представлены как классический трехмерный массив, глубина которого соответствует красному, синему, зеленому каналам. Первоначально использовалась сеть с пятью выходными нейронами, соответствующими четырем типовым неисправностям и одному исправному состоянию. Общее число нейронов – 21413.

Список использованных источников

1. **Матвеева Т.И., Редников С.Н.** Анализ применения методики экспресс-диагностики насосных агрегатов // *Сельский механизатор*. 2023. № 6. С. 38-40. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-6-38-39-40.
2. **Бакштанин А.М., Матвеева Т.И.** Тенденции развития цифровых гидравлических технологий в АПК // *Научно-инновационное развитие АПК. Цифровая трансформация, искусственный интеллект и интеллектуализация производства: сборник статей Всероссийской национальной научно-практической конференции, Екатеринбург, 25-26 ноября 2021 г.* Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2022. С. 149-152.
3. **Соколова О.В., Соколов И.С.** Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников асинхронных электродвигателей // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2019. Т. 11, № 3. С. 592-599.
4. **Редников С.Н.** Использование комплексного подхода в диагностике гидравлических систем металлургического оборудования / *Закиров Д.М., Ахмедьянова Е.Н., Ахмедьянова К.Т.* // *Наука и бизнес: пути развития*. 2018. № 10 (88). С. 8-10.
5. **Bashirov M., Nemirovskiy A., Aluynov A., Vyatkina O., Salikhova R.** Destruction of electrical insulating structures of electric motors during various drying techniques // *E3S Web of Conferences*. 2020. С. 01066.
6. **Матвеев А.С.** Вероятностные модели определения оптимальной периодичности ремонтно-профилактических воздействий // *Природообустройство*. 2009. № 3. С. 96-98.
7. **Шакурова Р.З.** Разработка надежного и энергоэффективного способа диагностики технического состояния энергетического оборудования // *Научному прогрессу – творчество молодых*. 2019. № 2. С. 195-197.
8. **Редников С.Н., Закиров Д.М., Платов С.И., Огарков Н.Н.** Анализ использования тепловизионных методов диагностики металлургического оборудования // *Перспективы науки*. 2018. № 11(110). С. 14-17.
9. **Rednikov S., Akhmedyanova E., Akhmedyanova K., Toymurzin D.** Effective diagnostics of metallurgical equipment // *Proceedings-2020 Global Smart Industry Conference, GloSIC2020*. Chelyabinsk, 17-19 ноября 2020 г. Chelyabinsk. 2020. Pp. 151-156. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267858.

Выводы

Анализ технического состояния центробежного насоса наглядно показал обоснованность применения авторами данного вида диагностирования, а именно применение теплового контроля в диагностике гидрооборудования в пост-ремонтном состоянии.

Использование систем обработки диагностической информации с помощью глубинных нейронных сетей является наиболее целесообразным при комплексном обследовании, с анализом методами искусственного интеллекта не менее чем двух независимых методов оценки состояния объекта.

References

1. **Matveeva T.I., Rednikov S.N.** Analysis of the application of the method of express diagnostics of pumping units // *Rural machine operator*. 2023. № 6. P. 38-40. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-6-38-39-40.
2. **Bakshstanin A.M., Matveeva T.I.** Trends in the development of digital hydraulic technologies in the agro-industrial complex // *Scientific-innovation development of AIC. Digital transformation, artificial intelligence and Intellectualization of production: collection of articles of the All-Russian national scientific and practical conference, Yekaterinburg, November 25-26, 2021*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2022. P. 149-152.
3. **Sokolova O.V., Sokolov I.S.** Device for diagnosing inter-turn closures and defects of bearings of asynchronous electric motors // *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2019. T. 11. № 3. P. 592-599.
4. **Rednikov S.N.** Use of integrated approach in diagnostics of hydraulic systems of metallurgical equipment / *S.N. Rednikov, Zakirov D.M., E.N. Akhmedyanova, K.T. Akhmedyanova* // *Science and business: ways of development*. 2018. № 10(88). P. 8-10.
5. **Bashirov M.** Destruction of electrical insulating structures of electric motors during various drying techniques/ *Bashirov M., Nemirovskiy A., Aluynov A., Vyatkina O., Salikhova R.* // *E3S Web of Conferences*. 2020. С. 01066.
6. **Matveev A.S.** Probabilistic models for determining the optimal periodicity of repair and preventive effects // *Prirodoobustrojstvo*. 2009. № 3. P. 96-98.
7. **Shakurova R.Z.** Development of a reliable and energy-efficient method for diagnosing the technical state of energy equipment. 2019. № 2. P. 195-197.
8. **Rednikov S.N.** Analysis of the use of thermal imaging methods for diagnostics of metallurgical equipment / *S.N. Rednikov, D.M. Zakirov, S.I. Platov, N.N. Ogarkov* // *Perspectives of science*. 2018. № 11(110). P. 14-17.
9. **Effective diagnostics of metallurgical equipment / S. Rednikov, E. Akhmedyanova, K. Akhmedyanova, D. Toymurzin** // *Proceedings – 2020 Global Smart Industry Conference, GloSIC2020*, Chelyabinsk, 17-19 November, 2020. Chelyabinsk: 2020. P. 151-156. – DOI 10.1109/GloSIC50886.2020.9267858.

10. **Бенин Д.М.** Диагностика и надежность гидравлических систем в условиях городского хозяйства: монография. М.: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2018. 202 с.

11. **Редников С.Н.** Использование комбинированных методов диагностики гидравлических систем металлургических агрегатов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2017. № 4. С. 94-98.

12. **Редников С.Н., Караашев Х.А.** Методика оценки режимов работы насосов в системах охлаждения металлургических агрегатов // Тяжелое машиностроение. 2018. № 10. С. 20-23.

13. **Редников С.Н., Найгерт К.В., Прокудина Л.А.** Методика расчета адсорбционных процессов в малых зазорах проточной части приводов высокого давления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». 2017. Т. 17, № 1. С. 21-32.

10. **Benin D.M.** Diagnostics and reliability of hydraulic systems in the conditions of urban economy. Monograph. Moscow: Editorial board of the journal "Mechanization and Electrification of agriculture", 2018. 202 p.

11. **Rednikov S.N.** Use of combined methods of diagnostics of hydraulic systems of metallurgical aggregates // Problems of ferrous metallurgy and material science. 2017. № 4. P. 94-98.

12. **Rednikov S.N., Karaashev Kh.A.** Methods of assessing the modes of operation of pumps in cooling systems of metallurgical aggregates // Heavy engineering. 2018. № 10. P. 20-23.

13. **Rednikov S.N., Naigert K.V., Prokudina L.A.** Methodology for calculating adsorption processes in small gaps of the flow part of high-pressure drives // Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. 2017. V. 17. № 1. P. 21-32.

Об авторах

Сергей Николаевич Редников, д-р техн. наук, доцент; Scopus – 57170810400, SPIN-код – 6267-1900, AuthorID: 119444; srednikov@mail.ru

Татьяна Ивановна Матвеева, канд. техн. наук, доцент; Scopus – 57226403084, SPIN-код – 4020-2495, AuthorID: 939474; timatveeva@rgau-msha.ru

Дмитрий Михайлович Бенин, канд. техн. наук, доцент; Scopus – 57216751281, SPIN-код – 6243-0567, AuthorID: 708496; dbenin@rgau-msha.ru

Елена Наильевна Ахмедьянова, ст. преподаватель; Scopus – 57170868800, spin-код – 3754-9120, authorid: 778394; karinlen@mail.ru

Александр Сергеевич Матвеев, канд. техн. наук, доцент; spin-код – 1541-5529, authorid: 709785; matveev@rgau-msha.ru

Author information

Sergey N. Rednikov, DSc (Eng), associate professor; Scopus – 57170810400, SPIN-code – 6267-1900, AuthorID: 119444; srednikov@mail.ru

Tatiana I. Matveeva, CSc, associate professor; Scopus – 57226403084, SPIN-code – 4020-2495, AuthorID: 939474; timatveeva@rgau-msha.ru

Dmitry M. Benin, CSc (Eng), associate professor; Scopus – 57216751281, SPIN-code – 6243-0567, AuthorID: 708496; dbenin@rgau-msha.ru

Elena N. Akhmedyanova, senior lecturer; Scopus – 57170868800, spin-code – 3754-9120, authorid: 778394; karinlen@mail.ru

Alexandr S. Matveev, CSc (Eng), associate professor; spin-code – 1541-5529, authorid: 709785; matveev@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Редников С.Н., Матвеева Т.И., Бенин Д.М., Ахмедьянова Е.Н., Матвеев А.С. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

The authors declare no conflict of interest / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial 26.12.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 28.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 28.02.2024

S.N. Rednikov, T.I. Matveeva, D.M. Benin, E.N. Akhmedyanova, A.S. Matveev performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.