УДК 621.9.048
DOI: 10.31471/1993-9965-2022-1(52)-50-56

МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИВОДА НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТРУБОПОРОВОДІВ

В. О. Пирогов

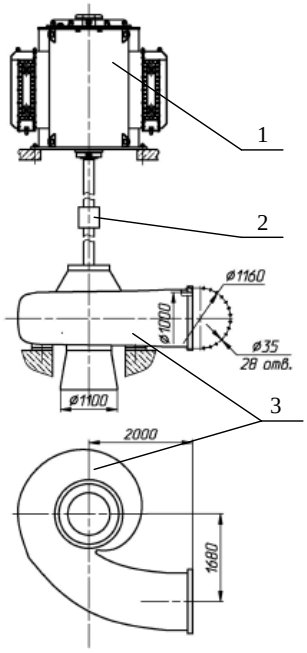
Сумський національний аграрний університет; 40000, м. Суми вулиця Герасима Кондратьєва, 160,
e-mail: a d m i n @ s n a u . e d u . u a

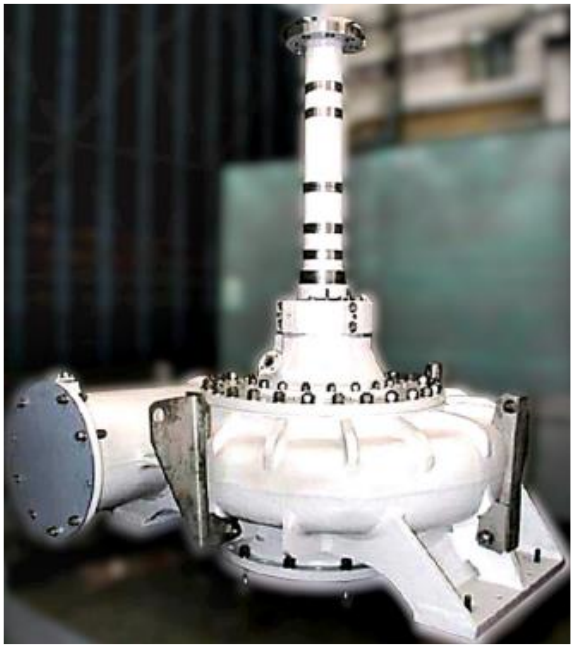
Розглянуто проблему модернізації трубопровідних транспортних систем: працюючих, пошкоджених і тих що будуються. При цьому доведена необхідність заміни обладнання та придбання сучасного нового. Модернізація передбачає заміну насосно-силового обладнання на насосних станціях (НС). Показано, що практично в усіх трубопроводах задіяні НС, що складаються переважно з відцентрових насосів, муфт і електродвигунів, підвищення надійності і довговічності яких є актуальним завданням. Розглянуто конструкцію та умови експлуатації насосного обладнання вітчизняних виробників. Проведено аналіз надійності та довговічності насосних агрегатів. Встановлено вплив на надійність насосних агрегатів різних факторів: сезонності, вологості, забрудненості абразивними частинками та корозійного впливу робочого і оточуючого середовища. На підставі проведених математичних статистичних досліджень обґрунтовано, що надійність технологічного обладнання трубопровідних систем залежить від електрообладнання, що застосовується в них. Аналіз відмов електрообладнання показав, що основна причина виходу з ладу електродвигунів обумовлена ушкодженнями підшипникових вузлів (ПВ). Основною причиною ушкоджень ПВ є відмова підшипників, що, в свою чергу, пов'язано з незадовільною роботою штатних ущільнень, що неспроможні забезпечити повної, майже 100% герметичності. Запропоновано вирішення проблеми підвищення герметичності ПВ приводів НС за рахунок їх модернізації, шляхом впровадження магніторідинних герметизаторів. Показано особливості конструкції та переваги запропонованого ущільнення. Основною перевагою магніторідинних герметизаторів є можливість забезпечення практично повної 100% герметизації. При цьому, запропонована конструкція магніторідинних герметизаторів не потребує значних капіталовкладень у модернізацію насосного обладнання та забезпечує суттєве підвищення його надійності та довговічності. Запропоноване технічне рішення може бути застосовано не лише для модернізації існуючих трубопроводів, а, також, при проєктуванні та будівництві нових.

Ключові слова: трубопровід, модернізація, насосна станція, електродвигун, підшипниковий вузол, математична статистика, герметичність.

The article considers the problem of domestic pipelines modernization at the stage of construction, operation and repair. The need to replace equipment and purchase a new one has been proved. Modernization involves the replacement of pumping and power equipment at pumping stations (PS). It is shown that in almost all irrigation methods involved PS, consisting mainly of centrifugal pumps, couplings and electric motors, increasing the reliability and durability of which is an urgent task. The design and operating conditions of domestic manufacturers pumping equipment are considered. The analysis of reliability and durability of pump units is carried out. The influence of various factors on the pumping units reliability: seasonality, humidity, contamination with abrasive particles and corrosion of the working process and environment has been established. On the basis of mathematical statistical research it was substantiated that the reliability of technological equipment of irrigated agriculture systems depends on the electrical equipment used in them. Analysis of electrical equipment failures showed that the main cause of electric motors failure is breakage of bearing units (BU). The main reason for the breakdown of the BU is the failure of the bearings, which in turn is due to the poor performance of the seals, which are unable to provide complete, almost 100% tightness. It is proposed to solve the problem of increasing the tightness of PS drives BU, due to their modernization, by introducing of magnetic fluid sealants. The features and advantages of the offered seals construction are shown. The main advantage of magnetic fluid seals is the ability to provide almost complete 100% sealing. At the same time, the proposed design of magnetic fluid sealants does not require significant investment in the modernization of pumping equipment and provides a significant increase in its reliability and durability. The proposed technical solution can be used not only for the modernization of existing pipelines, but also in the design and construction of new ones.

Key words: pipelines, modernization, pumping station, electric motor, bearing unit, mathematical statistics, tightness.





а – конструктивна схема електронасосного агрегату ЦВН 22600-9;
б – типовий загальний вигляд насоса ЦВН 22600-95 (без електроприводу)

Рисунок 1 – Обладнання, підготовлене АТ «СМНПО – Інжиніринг» для реконструкції та модернізації існуючих НС трубопроводів ГНС-1 та ГНС-2 в Республіці Таджикистан

Вступ

Трубопроводи є основним елементом лінійної частини технологічних, промислових та магістральних гідротранспортних систем, які можуть бути складовою частиною технологічного ланцюга гідро-механізованих підприємств (гірничозбагачувальних комбінатів, вуглезбагачувальних фабрик, об'єктів гідротехнічного будівництва і теплоенергетики, паливно-енерге-тичних комплексів та інше), а також мати самостійне значення, як частина єдиної транспортної мережі країни [1].

Проблема підвищення ефективності та надійності обладнання трубопровідних систем завжди була досить актуальним завданням. Останніми роками ситуація ускладнилася насамперед фізичним старінням устаткування, що пов'язані з недостатністю коштів, вкладених у його оновлення. У зв'язку з цим доцільне як освоєння нових технологій, так і підвищення ефективності технологічних процесів, застосовуваних в трубопровідних системах.

Енергоефективна та надійна робота трубопроводів у різних кліматичних умовах (від суворого різко континентального до дуже жаркого) залежить від суворого дотримання системних оптимальних технологічних параметрів роботи кожного локального об'єкта насосних станцій (НС). Це значною мірою визначається досконалістю тисяч експлуатованих НС.

Постановка проблеми

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Постачанням насосного обладнання для реконструкції та модернізації існуючих НС впродовж десятків років займається АТ «СМНПО – Інжиніринг» (колишнє СМНПО ім. М.В. Фрунзе), м. Суми.

В 2021 році спеціалістами АТ «СМНПО – Інжиніринг» підготовлена поставка обладнання (рис. 1) для реконструкції та модернізації існуючих НС трубопроводів ГНС-1 та ГНС-2 в Республіці Таджикистан. Дана технічна пропозиція розроблена відповідно до запиту ТОВ СП «СогдЕкоПром» на насосне обладнання в рамках проєкту заміни морально зношених вертикальних насосних агрегатів типу 52В-11 (аналог 1200В 6,3/100) виробництва АТ «Уралгідромаш» з електродвигуном типу ВДС-325-69-16 потужністю 8 000 кВт, напругою 10 кВ та частотою обертання 375 об/хв, які працюють на цих об'єктах з 1960-х років.

Обладнання, що постачають (табл. 1), представляє собою агрегат електронасосний відцентровий вертикальний, одноступінчастий, спірального типу, з одностороннім робочим колесом. Він призначений для перекачування води та інших рідин, аналогічних за в'язкістю

та хімічною активністю, із вмістом завислих частинок не більше 3 г/л, розміром не більше 0,1 мм, з них абразивних частинок не більше 2%, з температурою не більше 45 ºС.

Таблиця 1 – Технічна характеристика

Подача, $м^3$ /год	Натиск, м	ККД насоса, %	Споживана потужність не більше, кВт	Частота обертання, об/хв	Маса, кг, не більше
22 680	95	80	6 800	1 000	25000

Основні переваги агрегату ЦВН 22600-95: найменша маса порівняно з аналогами; потужність у номінальному режимі роботи – 6 800 кВт (економія на електроенергії в порівнянні з аналогами складе близько 16 800 кВт на добу); середнє напрацювання на відмову – не менше 20 000 годин; середній ресурс між капітальними ремонтами – щонайменше 28 000 годин; приєднувальні розміри повністю збігаються із встановленими раніше насосами.

Насосні станції, як правило, знаходяться і працюють у важких умовах оточуючих середовищ (вологість, пар, наявність у повітрі слідів кислоти або лугу), а деталі їх окремих об'єктів підлягають різним видам зносу: абразивному, корозійно-механічному, кавітаційному та іншим, вплив яких не припиняється навіть тоді, коли насос не працює.

Будь-яка НС складається з наступних складальних одиниць: відцентровий насос; муфта (як правило зубчаста); привод (електродвигун); металева несуча конструкція.

Слід відмітити, що «вузьким» місцем підвищення ресурсу НС є привод відцентрового насоса. Як привод використовують, в основному, асинхронні двигуни (АД), і вони виходять з ладу або через руйнування підшипників, або пошкодження обмоток.

Надійність підшипникових вузлів залежить від форми та якості поверхневого шару деталей, від наявності мастильного матеріалу, перебігу процесу мащення, відведення продуктів зносу та тепла, але, насамперед, від забезпечення герметичності підшипникового вузла загалом [2].

Менш ніж 30% підшипників повністю відпрацьовують закладений виробником термін служби. Більшість з них виходять з ладу внаслідок влучення в корпус забруднень із довкілля [3].

Численні дослідження показали, що основною проблемою виходу підшипників з ладу є забруднення їх мастила. Найбільша кількість забруднень потрапляє у корпус підшипників через місця виходу валу та вентиляцію корпусу.

Досвід експлуатації підшипникових вузлів (ПВ) показує, що в них проникає значна кількість пилу, сторонніх частинок, у тому числі абразивних і агресивних, вологи, водяного туману і т. д., що викликає передчасне зношування і подальші руйнування самого підшипника, а потім і всього агрегату загалом.

У зв'язку з цим ущільнення ПВ повинні:

– забезпечити повну герметичність;

– добре утримуватись у ПВ;

– забезпечувати мінімальне тертя та знос;

– мати необхідну механічну стабільність;

– бути стійкими в експлуатації до впливу підвищених позитивних та негативних температур, навантажень, кисню, повітря, вологи, пилу та агресивних компонентів;

– працювати при високих швидкостях обертання валу;

– мати просту конструкцію та не пред'являти підвищених вимог до чистоти обробки;

– мати високу ремонтопридатність.

Установка ущільнення передбачає:

1) виключення витоків змащувальної рідини з підшипника або робочого середовища з корпусу машини в місці виходу валу, що обертається;

2) захист вкладишів підшипників від попадання в них пилу, бруду, металевих частинок, а також небажаних продуктів робочого середовища – кислот, лугів та різних пар.

Метою роботи є підвищення надійності і довговічності приводу НС, шляхом проведення дослідження методами математичної статистики відмов АД та на їх підставі обґрунтовано вибрати найбільш прийнятний тип ущільнювального пристрою, який забезпечить його максимальну герметичність.

Виклад основного матеріалу досліджень

Було прийнято метод експлуатаційних спостережень, оскільки він на підставі

ISSN 1993–9965 print ISSN 2415–3524 online
Науковий вісник ІФНТУНГ 2022. № 1(52)

інформації про відмови привода відцентрового насосу дозволяє системно вирішити такі задачі:

– виявлення найбільш "слабких" вузлів та деталей, якими визначається надійність та працездатність АД загалом та причин виникнення їх відмов;

– встановлення закономірності зміни надійності та працездатності вузлів АД під впливом тих чи інших умов довкілля;

– виявлення недоліків проєктування, виготовлення та експлуатації;

– уточнення показників надійності, встановлених у нормативно-технічній документації на конкретний тип двигунів.

При дослідженні відмов АД прийнято такі припущення:

– АД у вибірках аналогічні за конструкцією;

– АД мають аналогічні умови експлуатації;

– вибірки складаються з АД, що мають різний час початку та кінця експлуатації;

– всі АД, що відмовили, замінюються новими, кількість експлуатованих електродвигунів залишається постійною.

Аналізовані АД піддаються комплексному впливу теплоти, вібрації, пилу, вологи тощо. Так, коливання температури протягом року у різних кліматичних зонах становлять від плюс 40 до мінус 55˚С, коливання відносної

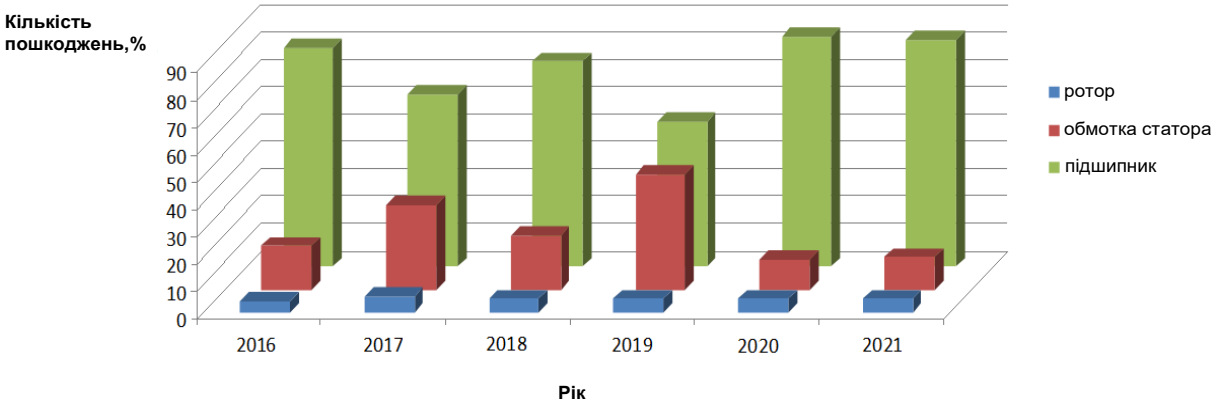


Рисунок 2 – Діаграма характеру пошкоджень АД на підприємствах України та середньої смуги Росії за шість років

Таблиця 2 – Середньомісячні інтенсивності відмов електродвигунів

Компоненти аналізу	Місяці											
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Середня інтенсивність відмов, $\lambda \cdot 10^{-5}$, год$^{-1}$	13,5	11,8	10,6	11,5	7,8	11,1	14,8	15,8	6,3	9,8	12,1	16,5
Коефіцієнт варіації інтенсивності відмов, %	77	47	61	49	79	40	56	36	97	73	56	59

Для визначення характеру та причин відмов АД було проведено системне вивчення умов експлуатації значної кількості двигунів з урахуванням природно-кліматичних умов (ПКУ) на різних об'єктах.

Всього було зібрано та оброблено статистичний матеріал про більш ніж 4000 асинхронних електродвигунів, що вийшли з ладу. Аналіз статистичного матеріалу проводився за допомогою методів математичної статистики [4]. Дані про середньомісячну відносну вологість, температуру повітря, тривалість випадання роси і т. ін. бралися з архівів метеостанцій, вільний доступ до яких є в Інтернеті.

вологості – від 15 до 100%, запиленості повітря у разі піщаних бур – до 800…900 мг/м^3 [5].

На підставі аналізу статистичних даних про причини передчасного виходу електродвигунів з ладу виділені як «слабкі ланки» такі елементи конструкцій АД: підшипниковий вузол – ушкодження становлять 73%, обмотка статора – 24%, ротор – 3% від загальної кількості відмов АД. Інші ушкодження АД були в інтервалах похибки і тому не розглядалися.

На рис. 2 представлена діаграма характеру пошкоджень АД, розташованих на територіях України, Росії, Білорусі, Казахстану, Узбекистану в різні роки. Ці дані добре

корелюються з результатами, наведеними в [6], де 80% відмов пов'язані з пошкодженнями підшипників, 16% – з статорною обмоткою і 4% – з ротором, а також з даними, що обговорювалися на першому семінарі з проєктування, управління та діагностики електричних машин WEMDCD'2013, де пошкодження підшипників склали 69%, обмоток статора – 21%, ротора – 7% та пошкодження, пов'язані зі сполучними муфтами вентилятора – 3% [7].

Далі було вивчено вплив сезонних змін на інтенсивність відмов АД. Методом математичної статистики було опрацьовано всі відомі дані про відмови АД у різних кліматичних умовах. Результати досліджень наведено у табл. 2.

Високі значення коефіцієнтів варіації пояснюються тим, що статистично оброблялися результати роботи АД у різних умовах експлуатації, причому аналізувалися електродвигуни різної потужності та різних заводів – виробників з метою зниження впливу технології виготовлення. Це було зроблено з метою збільшення обсягу вибірки.

З розгляду табл. 2 видно, що інтенсивність відмов значно вища у найспекотніші місяці року, але в холодні місяці, коли двигун переважно не працює, показник відмов також значний. Однак необхідно враховувати, що в період високих літніх температур багато підприємств застосовують установку систем зволоження повітря.

При проведенні комплексного аналізу статистичних даних щодо відмов АД було виявлено переважання фактору вологості повітря порівняно з іншими факторами, пов'язаними з кліматичними умовами. Значно меншою мірою на знос АД впливають вплив агресивних газів та пилу.

Волога проникає всередину АТ головним чином через вихідний вал внаслідок недостатньо ефективну роботу ущільнення.

Найчастіше волога проникає всередину АД у періоди, коли останній перебуває у непрацюючому стані. Особливо інтенсивно цей процес йде під час остигання електродвигуна після його роботи, оскільки виникає різниця тисків між повітрям усередині АД і зовні, при цьому повітря засмоктується всередину АД. При нагріванні тиск повітря всередині АД тиск підвищується і повітря виходить назовні. При наступних включеннях/відключеннях АД цикл повторюється. Зниження температури електродвигуна майже завжди супроводжується випаданням роси.

Тривалий вплив високої вологості викликає змив мастила з верхнього ПВ, корозію металевих деталей, набухання та гідроліз органічних матеріалів ізоляції. Продуктом гідролізу є органічні кислоти, що руйнують матеріали та інтенсифікують корозію. Наявність у вологій атмосфері промислових газів та пилу призводить до прогресуючої корозії. При цьому вологе повітря (іноді разом з пилом) всмоктується, в основному, через ПВ, що підтверджує дефектація електродвигунів, які відмовили. Мастило всіх підшипників або повністю змите, або сильно забруднене.

Під впливом вологи відбувається зміна електричних, фізико-механічних та хімічних властивостей електроізоляційних матеріалів у бік їхнього погіршення. Через постійну зміну відносної вологості середовища при експлуатації (добові коливання відносної вологості середовища, зміни вологості електроізоляційних матеріалів обмотки при роботі та простоюванні електродвигунів) волога проникає в матеріал то на одну, то на іншу глибину. При цьому зовнішні та внутрішні шари її розбухають по-різному . Внаслідок цього в поверхневому шарі обмотки ізоляції утворюються дрібні тріщини, які сприяють інтенсивному проникненню вологи всередину матеріалу. При цьому електричні характеристики електроізоляційного матеріалу погіршуються, а механічна міцність зменшується і тим швидше, чим більша частота змін відносної вологості повітря.

Ущільнення, традиційно застосовувані як штатні у згаданих електродвигунах, дуже далекі від досконалості і характеризуються, в основному, максимальною простотою і мінімальною вартістю при виробництві. При цьому складається враження, що експлуатаційні витрати користувачів електродвигунів не цікавлять (або не цікавили) виробників даного виду обладнання.

У двигунах виробництва ВАТ «Електромаш» (м. Тираспіль, Молдова), як правило, використовуються щілинні ущільнення з жировими канавками, виконаними на внутрішній циліндричній поверхні центральної частини кришки верхнього підшипника, що утворює щілину з циліндричною поверхнею валу. У двигунах виробництва ВАТ «Електроважмаш-Привод» (м. Лисьва) використовуються сальникові ущільнення з повстяним кільцем, встановленим у канавці кришки верхнього підшипника.

ISSN 1993–9965 print ISSN 2415–3524 online
Науковий вісник ІФНТУНГ 2022. № 1(52)

Українські виробники електродвигунів також використовують сальникові ущільнення.

Багаторічна експлуатація показала недостатню надійність даних типів ущільнень в умовах, що розглядаються як у літній, так і в зимовий час. Вода потрапляє всередину ПВ, викликаючи руйнування мастила, корозію підшипників, підвищення вологості обмотки електродвигуна та падіння її опору ізоляції, що призводить до необхідності сушіння обмотки в умовах спеціалізованої ділянки електроремонтного цеху підприємства. Механічний контакт повсті сальника або манжети з валом призводить до його зношування, що викликає необхідність наплавлення та обробки валу або повної його заміни.

Одним із можливих шляхів вирішення даної проблеми є застосування нового типу ущільнень – магніторідинного герметизатора (МРГ), основною перевагою якого є можливість забезпечення практично повної 100% герметизації [8].

Пояснюється це тим, що МРГ мають ряд переваг перед традиційними конструкціями ущільнень: практично повна герметичність за заданих умов роботи, мінімальне зношування внаслідок виключно рідинного тертя в зазорі між рухомими та нерухомими елементами, відсутність необхідності в змащенні, низькі втрати потужності та малий момент опору, висока ремонтопридатність, простота обслуговування.

У спрощеному вигляді МРГ можна представити як набірну магнітну систему, затиснуту між двома сталевими кільцями – полюсними наконечниками, що охоплюють вал зовні та ув'язненими у немагнітну обойму. Магнітне поле замикається через зазор між полюсними наконечниками та валом, який заповнюється магнітною рідиною, що утримується магнітним полем. Розмір зазору – 0,2-0,25 мм.

Магнітні рідини (МР) є штучними рідкими середовищами, що володіють унікальним поєднанням плинності і здатності взаємодіяти з магнітним полем.

Магнітні рідини є стійкими колоїдними розчинами твердих магнітних частинок у рідкому носії. Найбільш широко використовувані властивості магнітних рідин – здатність утримуватися у певній точці простору магнітним полем і магніторідинна левітація, тобто виштовхування під дією магнітного поля немагнітних тіл з МР.

Висновки

1. Обґрунтовано, що надійність технологічного обладнання трубопровідних систем залежить від електрообладнання, що застосовується в них.

2. Проаналізовано відмови електрообладнання та зроблено висновок, що основна причина виходу з ладу електродвигунів обумовлена ушкодженнями ПВ.

3. Проаналізовано умови експлуатації ПВ та зроблено висновок, що основною причиною відмов підшипників є незадовільна робота ущільнень. Штатні ущільнення не спроможні забезпечити повної, майже 100% герметичності.

4. Запропоновано вирішення проблеми герметичності ПВ приводів НС за рахунок їх модернізації шляхом впровадження МРГ у трубопровідному транспорті. Необхідно відзначити, що хороші результати використання МРГ були отримані у нафтопереробній та хімічних галузях [9].

Література

1. Трубопровід. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Трубопровід

2. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: справочник-каталог. М.*:* Машиностроение, 2003. 576 с.

3. Хасселфелд Р. Правильный выбор защитных уплотнений подшипников. *Химическая техника*. № 9. 2017. С. 16−17.

4. Ивановский Р.И Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб.: БХВ. Петербург, 2008. 528 с.

5. Никиян Н.Г., Ямансарин И.И. О влиянии климатических факторов и режимов работы на эксплуатационную надежность асинхронных двигателей. *Вестник ГИУА. Серия "Электротехника, энергетика*". 2013. Вып. 16, №1. С. 27–36.

6. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А. и др. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2-14. №3 (57). С. 34–40.

7. Filippetti F., Belini A., Capolino G.A. Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines State of Art and Future Perspectives. *Published in conference*

WEMDCD'2013. March, 11-12, IEEE. P. 196–209. DOI: 10.1109/WEMDCD.2013.6525180

8. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Горнов В.А. и др. Асинхронные двигатели серии ВАСО4 с магнитожидкостными герметизаторами. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2004. №3. С 29−32.

9. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов на нефтеперерабатывающих заводах стран СНГ. *Химическая техника*. 2015. №10. С. 11 – 17.

References

1. Truboprovid. URL:: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Truboprovid

2. Chermenskiy O.N., Fedotov N.N. Podshipniki kacheniya: spravochnik-katalog. M.: Mashinostroenie, 2003. 576 p.

3. Hasselfeld R. Pravilnyiy vyibor zaschitnyih uplotneniy podshipnikov. *Himicheskaya tehnika.* № 9. 2017. P. 16

4. Ivanovskiy R.I Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Osnovyi, prikladnyie aspektyi s primerami i zadachami v srede Mathcad. SPb.: BHV. Peterburg, 2008. 528 p.

5. Nikiyan N.G., Yamansarin I.I. O vliyanii klimaticheskih faktorov i rezhimov rabotyi na ekspluatatsionnuyu nadezhnost asinhronnyih dvigateley. *Vestnik GIUA. Seriya "Elektrotehnika, energetika"*. 2013. Vol. 16, No 1. P. 27–36.

6. Safin N.R., Praht V.A., Dmitrievskiy V.A. i dr. Diagnostika neispravnostey asinhronnyih dvigateley na osnove spektralnogo analiza tokov statora. *Energobezopasnost i energosberezhenie*. 2-14. No3 (57). P. 34–40.

7. Filippetti F., Belini A., Capolino G.A. Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines State of Art and Future Perspectives. *Published in conference WEMDCD'2013*. March, 11-12, IEEE. P. 196–209. DOI: 10.1109/WEMDCD.2013.6525180

8. Radionov A.V., Vinogradov A.N., Gornov V.A. i dr. Asinhronnyie dvigateli serii VASO4 s magnitozhidkostnyimi germetizatorami. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2004. No 3. P. 29.

9. Radionov A.V. Opyit ekspluatatsii magnitozhidkostnyih germetizatorov na neftepererabatyivayuschih zavodah stran SNG. *Himicheskaya tehnika.* 2015. No 10. P. 11 – 17.