

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

САФОНЮК ІВАН ЮРІЙОВИЧ

УДК 625.144.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ГІДРАВЛІЧНИХ АГРЕГАТІВ**  
**КОЛІЙНИХ МАШИН ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ**  
**ОЧИСТКИ ОЛИВ ВІД ВОДИ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 І.Ю. Сафонюк

Науковий керівник

Скорик Олексій Олексійович,  
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

Сафонюк І.Ю. Підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин шляхом удосконалення електричної очистки олив від води. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» (273 – Залізничний транспорт). - Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено питанню підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин шляхом удосконалення електричної очистки олив від води. Це досягається визначенням раціональних параметрів зовнішнього електричного поля, що дозволяє зменшити час коалесценції крапель води.

Встановлено, що методи видалення механічних домішок із олив гідравлічних приводів добре вивчені та широко застосовуються у всіх галузях промисловості. Однак механічні домішки – це лише один з факторів забрудненості нафтопродуктів. Іншим, не менш важливим фактором забруднення є наявність води.

Проведений аналіз методів видалення води із нафтопродуктів дає підстави стверджувати, що відомі методи очистки ГО від води не можуть бути застосовані на засобах транспорту, а саме на колійних машинах важкого типу. Причиною цього є висока енергоємність або матеріалоємність обладнання.

Доведено, що найбільш перспективним методом видалення води із гідравлічної оливи на засобах транспорту є електроочистка. Цей метод є енергоефективним та не потребує значних капітальних вкладень, однак застосування таких систем очистки на засобах транспорту потребує детального вивчення та вдосконалення.

Проведено аналіз вмісту води та механічних домішок у гідравлічних оливах колійних машин Південної залізниці. Проби відбирались із машин

ПМГ та МПТ-4. Попередні дослідження показали, що гідравлічні оливи містять води до 0,85 %, що суттєво обмежує ресурс.

Проведено дослідження щодо визначення зв'язку напрацювання та концентрації оливи, а також трибологічних характеристик олив, відібраних із гідравлічних приводів колійних машин. Найбільш наочним показником трибологічних характеристик є показник зносу. Досліджувались оливи як в стані відбору, так і оливи, які пройшли теплове сушіння.

Оскільки дія механічних домішок була цілком виключеною шляхом фільтрування, можна стверджувати, що тривалий вплив води на оливу погіршує її трибологічні характеристики пропорційно її концентрації. У свою чергу концентрація води в оливі пропорційна її напрацюванню. Такі дані підтвердили актуальність обраної тематики та дозволили обґрунтувати напрям та методи дисертаційного дослідження.

В подальшому запропонована загальна методика прогнозування ресурсу гідроагрегатів засобів транспорту. Ресурс рухомих елементів гідравлічних агрегатів колійних машин визначається характером процесу зношування та його інтенсивністю.

При роботі гідроагрегатів показники зношування не зберігають постійних значень. В типовій моделі зношування виділяють три періоди: припрацювання, встановленого режиму та катастрофічного зносу. При визначенні ресурсу гідроагрегатів раціонально розглядати другий період, що характеризується стійким режимом зношування, оскільки тривалість режиму припрацювання зазвичай складає 1,5-2 % від ресурсу вузлів тертя.

Оскільки гідравлічні агрегати колійних машин працюють в екстремальних умовах, то можна стверджувати, що в їх вузлах протікають такі основні види зношування: механічне (абразивне, гідроабразивне, втомлювальне) та корозійно-механічне. Тому вплив диспергової води на знос визначався шляхом порівняння отриманих результатів експериментальних досліджень із чистою оливою та з домішкою диспергової води.

Наведені методики експериментальних досліджень фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей гідравлічних олиव, методологія досліджень стану та руху води в гідравлічній оливі під дією зовнішніх силових полів, методика та обладнання експериментальних досліджень коалесценції води в гідравлічній оливі.

Теоретично та експериментально досліджений вплив концентрації води у гідравлічній оливі на ресурс прецизійних пар гідравлічних агрегатів колійних машин, а саме пари плунжер-гільза аксіально-плунжерного насоса.

Міра зношування від корозійного впливу води, на прикладі аксіально-плунжерного насоса, визначалась виходячи із того, що в парі тертя проходять трибохімічні реакції, які призводять до пошарового окислення поверхонь. При цьому між поршнем та гільзою існує технологічний зазор  $\Delta$ , який для справного аксіально-поршневого насоса становить 10-50 мкм.

Механізм взаємодії води та кисню з поверхнею металу має електромагнітну природу. Молекула води є полярним діелектриком, тому вона потрапляє в поле дії кристалічної решітки поверхні металу. Силове поле поверхні нелінійно ослаблюється, віддаляючись від поверхні металу. Диспергована в оливі вода у вигляді мікроскопічних крапель, наближаючись до поверхні металу, поляризується, утворюючи своє локальне поле, та набуває властивостей електричного диполя. Сила, що виникає між ними, називається вандерваальсовою силою.

Для порівняння активності молекул, дипольний момент олеїнової кислоти становить  $4,84 \cdot 10^{-30}$  Кл·м; стеаринової кислоти -  $5,80 \cdot 10^{-30}$  Кл·м; а води –  $6,152 \cdot 10^{-30}$  Кл·м. Отже, полярна активність молекули води, а як наслідок, і її реакція на електромагнітне поле дещо перевищує класичні полярно активні присадки.

Слід зазначити, що у випадку електричного притягування молекули води до металу процес не закінчується полярним (фізичним) зв'язком. Оскільки переважна більшість металів, які застосовуються у машинобудуванні, є більш активними, ніж водень, то виникає хімічний

зв'язок – перехід електронної орбіталі від водню до металу, внаслідок чого утворюється гідроксид, а згодом і оксид металу (новоутворений іонний зв'язок міцніший, ніж зв'язок металу між собою в кристалічній решітці).

Таким чином, поверхня тертя втрачає своє тіло (утворений осад не зв'язаний з поверхнею та змивається новою порцією оливи в насосі).

Звичайно, що в окисленні поверхні металу бере участь не вся вода, яка знаходиться в зазорі між плунжером та гільзою. Причиною цього є те, що поле поверхні діє на деяку величину  $h$  в глибину мастильного середовища. Ця величина знайдена, опираючись на енергетичний баланс. З одного боку, це енергія теплового руху молекул середовища, а з іншого – енергія поля поверхні.

Встановлено, що енергія поверхні металу перевищує енергію теплового руху на відстані близько  $7 \cdot 10^8 \text{ м} = 0,07 \text{ мкм}$ . А значить, краплі та окремі молекули води, що знаходяться на відстані менше  $0,07 \text{ мкм}$ , будуть притягуватися до поверхні металу (адсорбуватися) та вступати з нею у взаємодію.

Визначено кількість води, що притягується до металу, з чого було знайдено масу металу, що окислюється водою за один прохід плунжера та перераховано ресурс гідромотора.

Для підтвердження теоретичних досліджень були проведені експериментальні дослідження щодо визначення впливу вмісту води на зношування, які проводились на чотирикульковій машині тертя (ЧКМ) та на машині СМЦ-2.

Згідно з попередніми дослідженнями стану олив у гідравлічних приводах колійних машин Південної залізниці встановлено, що концентрація води в робочій рідині гідроприводів може сягати  $0,85 \%$  води при напрацюванні  $2000 \text{ мот. год}$ . Тому для досліду була прийнята максимальна концентрація води –  $1 \%$  за об'ємом. Як досліджувана робоча рідина була прийнята мінеральна олива И-30А. Для пари тертя були прийняті такі матеріали: сталь 38ХМЮА - ролик та БрАЖ9-4 – колодка.

Дослідження показали, що збільшення концентрації води в мастильному матеріалі до 1% призводить до збільшення зносу майже в два рази. Встановлені рівняння регресії, що описують зміну зносу досліджуваних зразків. Теоретичний та експериментальний ресурси мають досить високу збіжність, близьку до 13,2%.

Теоретично та експериментально досліджені процеси седиментації та коалесценції води в гідравлічній оливі під дією зовнішніх силових полів. Встановлено, що краплини розміром 10 мкм відстоюються зі швидкістю  $2,105 \cdot 10^{-7}$  м/с, з чого слідує, що відстоювання дрібнодисперсної води в гідравлічній оливі неможливе в експлуатаційних умовах. Тому для інтенсифікації процесу очистки гідравлічної оливи слід вести пошук методів, що базуються на інших принципах.

В роботі отримана просторова залежність дипольного моменту від радіуса краплі та напруженості зовнішнього електричного поля.

Для видалення дрібнодисперсної води на першому етапі слід забезпечити укрупнення крапель води до макророзміру. Це можливо за умови інтенсифікації руху поляризованих крапель та їх злиття.

В роботі вирішено диференціальне рівняння руху краплі води в оливі під впливом зовнішнього електричного поля. На основі диференціального рівняння проведено математичний розрахунок параметрів руху краплі в зовнішньому електричному полі. Дане диференціальне рівняння дає можливість обраховувати переміщення, швидкість та прискорення краплі води в оливі в залежності від напруженості електричного поля, частоти та діаметра краплі.

Проведено розрахунок частоти власних частот коливання за такими вихідними даними: напруга на електродах  $U = 500$  В; відстань між електродами  $h = 0,001$  м; діаметри крапель  $d$  в межах від 100 мкм до 1 мм. Слід також зауважити, що явище суперпозиції може виникати також у випадках, коли частоти коливань зовнішнього електричного поля та власних коливань співвідносяться як цілі числа.

В подальшому були проведені експериментальні дослідження з визначення впливу параметрів зовнішнього електричного поля як фактора злиття мікрокрапель в об'ємі гідравлічної оливи на час освітлення емульсії (час, за який емульсія руйнується та безперешкодно пропускає світло). Дослідженням піддавалась емульсія індустриальної оливи И-20 (90 %) та технічної води (10 %). Дисперсність емульсії становила в середньому 3-7 мкм. Відстань між електродами становила 1 мм, напруга між ними 100 В, отже, напруженість становила 100 кВ/м.

За результатами проведених досліджень одержано рівняння регресії, яке описує закономірність зміни часу освітлення від частоти та напруженості електричного поля. Встановлено, що мінімальний час освітлення складає 7 с при частоті 3 МГц та напруженості 500 кВ/м.

Результати досліджень показують, що як частота, так і напруженість зовнішнього електричного поля суттєво впливають на процес коалесценції води в оливі. Однак можливість підвищення напруженості електричного поля обмежена, оскільки виникає небезпека виникнення пробою. Також при надто високій напруженості, а тим більше в точках концентрації напруженості, може досягатись зворотний ефект – диспергування води. Підвищення ж частоти електричного поля від 300 Гц до 3 МГц дає змогу зменшити час коалесценції в середньому в десять разів. Підвищення ж частоти більше 3 МГц не дало б суттєвих результатів, оскільки від 300 кГц до 3 МГц спостерігається область насичення.

В роботі подано практичні рекомендації щодо застосування результатів дослідження. Доведено, що найбільш ефективним є застосування додаткової бортової системи очистки на гідравлічному баку, яка складається із електричного пристрою укрупнення крапель та серійного вологовідділювача укрупнених крапель.

Проведений розрахунок економічної ефективності використання запропонованого методу видалення води із гідравлічної оливи на прикладі колійної машини ВПР-1200 показав, що економічний ефект від

впровадження бортового очисника складає 185 500 грн на один рік експлуатації машини.

Результати роботи стосовно підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин шляхом удосконалення електричної очистки олів від води використовуються також у навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці бакалаврів за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування з дисциплін «Колійні машини», «Експлуатація машин», «Основи автоматизації машин» та при підготовці магістрів за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування з дисциплін «Основи нанотехнологій», «Надійність машин», «Ремонт машин».

Метод підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин шляхом удосконалення електричної очистки олів від води впроваджено у виробничий процес регіональної філії «Південна залізниця» при технічній експлуатації колійних машин. Це дозволило підвищити надійність гідравлічних приводів та підвищити строк служби гідравлічних олів.

Ключові слова: ресурс, гідравлічний агрегат, колійна машина, електроочистка, корозійне зношування, гідравлічна олива.

## **ABSTRACT**

Safoniuk I.Yu. Resource increasing of hydraulic gear of track machines by improving electrical purification of oil from water. - Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of technical science candidate on the specialty 05.22.20 – operation and maintenance of means of transport. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis deals with the issue of a longer service life of hydraulic units for track machines by improving electric removal of water from oils. This can be achieved through determination of rational parameters of the external electric field in order to shorten a coalescence period for water drops.



Techniques for purification of oils from mechanical impurities for hydraulic drives have been thoroughly studied and applied in all industries. However, mechanical impurity is just one of contaminations found in oil products. Another type of oil product contamination is water.

The analysis of techniques for removal of water from oil products testifies that all well-known methods used for purification of hydraulic oils from water cannot be applied for rail transport means, in particular, for heavy-duty track machines. The reason of it is high energy consumption or material capacity of the equipment.

It has been proved that the most promising technique to remove water from hydraulic oils for rail transport means is electrical purification. The method is power efficient and does not require great capital investments; however, use of such purification systems for rail transport means requires a further in-depth study and enhancement.

The study presents an analysis of water and mechanical impurities in hydraulic oils used for track machines on the Southern Railway. The samples were taken from a track motor nut runner ПМГ and a craned railway vehicle МИТ-4. Previous research has demonstrated that hydraulic oils contain up to 0.85 % of water which limits the service life.

The research determined a certain relationship between service life and oil concentration, as well as tribological characteristics of oils taken from hydraulic drives of track machines. The visual indicator of tribological characteristics is the wear factor. The researched included both oils before and oils after heat dehydration.

The research demonstrated that lasting influence of water on oil deteriorated its tribological characteristics proportional to the concentration (mechanical impurities were filtered and did not impact the oil). And water concentration in oil was proportional to the service life. The data obtained confirmed the importance of the topic chosen and allowed the author to ground the area and methods of the thesis research.

The research also proposes a general technique for forecasting a service life of hydraulic units for transport means. The service life of moving elements of hydraulic units for track machines is determined by a pattern and intensity of the wear.

In operation hydraulic units do not maintain the wear factors constant. A typical wear pattern has three modes: running-in mode, set mode and wear-out failure mode. While determining the service life of hydraulic units it is advisable to consider the second period characterized by a sustainable wear, since a running-in period generally accounts for 1.5 – 2% out of the service life for friction units.

As far as hydraulic units on track machines operate under extreme conditions, it is possible to claim that their units are subject to such basic wear types: mechanical (abrasive, hydro-abrasive and fatigue) and corrosion-mechanical. Therefore, an influence of dispersed water on wear was defined by comparing the results obtained during the experimental research of clean oil and oil with impurity of dispersed water.

The research presents techniques for studying physicochemical and operating characteristics of hydraulic oils, methodology of research into state and motion of water in hydraulic oils under external force fields, and method and equipment used in studying water coalescence in hydraulic oils.

The research concerns the theoretical and experimental study into relation between water concentration in hydraulic oils and service life of high-precision pairs of hydraulic units for track machines, notably the piston/sleeve pair of an axial piston pump.

The water corrosive wear was measured by an example of an axial piston pump, and on the basis that the friction pair underwent tribochemical reactions leading to step-by-step surface oxidation. The technological gap  $\Delta$  between the piston and sleeve for an operable axial piston pump was 10-50 mkm.

The interaction of water and oxygen with metal surface was of electromagnetic nature. A water molecule is a polar dielectric; therefore it got in the action field of the metal surface crystal lattice. The surface force field

weakened non-linearly and separated from the metal surface. The dispersed water in oil in the form of microscopic droplets, approaching the metal surface, polarized and created a local field of its own, and gained electric dipole properties. Thus, Van der Waals' forces appeared between them.

The molecular activities were compared considering that the dipole moment of butyric acid was  $4.84 \cdot 10^{-30}$  C·m, of stearic acid –  $5.80 \cdot 10^{-30}$  C·m, and of water –  $6.152 \cdot 10^{-30}$  C·m. Thus, the polar activity of water molecules, and, therefore, the reaction to the electromagnetic field slightly exceeded that of the standard polar active additives.

It should be mentioned that in electric attraction of a water molecule to metal the process was not terminated by establishing a polar (physical) bond. As far as a great majority of metals applied in engineering are more active than hydrogen, they set a chemical bond – a transfer of the electric orbital from hydrogen to metal, thus forming hydroxide, and, gradually, metal oxide (the formed ionic bond is stronger than the bond in the crystal lattice).

Thus, friction surface loses its body (the sediment formed had no bonds with the surface and could be washed off with a new portion of oil in the pump).

Typically, only part of water in the gap between the plunger and sleeve participated in the metal surface hydration. It could be explained by the certain depth  $h$  at which the surface field impacted the oil environment. The value was found on the basis of the energy balance. On the one hand, it was the energy of heat motion of the molecules of the environment, and on the other hand – the energy of the surface field.

It was established that the energy of metal surface exceeded the energy of heat motion at a distance of approximately  $7 \cdot 10^{-8}$  m = 0.07 mkm. Therefore, drops and separate water molecules at a distance of less than 0.07 mkm would be attracted to the metal surface (adsorb) and interact.

The amount of water attracted to the metal was defined, and on the basis of it metal mass hydrated by water per one travel of the plunger was defined, thus the service life of the hydraulic motor was re-calculated.

In order to confirm the theoretic research the author conducted the experiments to determine an impact of water on wear; the experiments were made with a four-ball friction machine (ЧКМ) and a friction test machine CMIQ-2.

According to the previous research into state of oils in hydraulic drives of track machines on the Southern railway, it was established that water concentration in a working substance of hydraulic drives could reach 0.85% of water at the operating time 2,000 running hours. Therefore, the maximum water concentration 1% by volume was taken for the research. And I-30A mineral oil was taken as a test operating oil. For a friction pair the following materials were taken: a roll of steel 38CrMoAl (38XMIOA) and a pad of CuAl9Fe4 (БрАЖ9-4).

The tests demonstrated that higher water concentration in oil material up to 1% increased the wear two times at the average. Besides, the author established regression equations describing a change in wear patterns for the test samples. The theoretical and experimental findings were of rather high similarity, approximately 13.2%.

Thus, water sedimentation and coalescence in hydraulic oils under external force fields were theoretically and experimentally researched. It was established that drops of 10 mkm settled with a speed of  $2.105 \cdot 10^{-7}$  m/sec; therefore, settlement of fine disperse water in hydraulic oils cannot be fulfilled under operating conditions. Therefore, innovative methods based on different principles should be developed to intensify the hydraulic oil purification.

The research presented a spatial dependency of dipole moment on drop radius and the external electric field intensity.

The first stage concerned the removal of highly dispersed water through coalescence of water drops up to macro size. It could be gained by intensive motion of polarized drops and their coalescence.

The research solved the differential equation of water drop motion in oil under the external electric field. The differential equation was on the basis of mathematical calculation of parameters of drop motion in the external electric field. The differential equation made it possible to calculate displacement, speed

and acceleration of a water drop in oil in dependence on electric field intensity, frequency and drop diameter.

The natural vibration frequencies were calculated by the following output data: voltage at electrodes  $U = 500 \text{ V}$ ; distance between the electrodes  $h = 0.001 \text{ m}$ ; drop diameter  $d$  in the range from  $100 \text{ }\mu\text{m}$  to  $1 \text{ mm}$ . It should also be mentioned that superposition can occur in cases when vibration frequencies of the external electric field and natural vibrations correlate as whole numbers.

The experimental research, conducted later on, determined influence of the external electric field parameters as a factor of micro droplets coalescence in hydraulic oil on an emulsion de-coloration period (time during which the emulsion disintegrates and freely lets through the light). An emulsion of industrial oil I-20 (90 %) and water (10 %) was taken for the study. The emulsion dispersity accounted for  $3\text{-}7 \text{ }\mu\text{m}$  at the average. The distance between the electrodes was  $1 \text{ mm}$ , voltage  $100 \text{ V}$ , therefore, the intensity was  $100 \text{ kV/m}$ .

The regression equation obtained described a change pattern for de-coloration depending on electric field frequency and intensity. It was established that the minimal de-coloration time was  $7 \text{ sec}$  at the frequency  $3 \text{ MHz}$  and the intensity  $500 \text{ kV/m}$ .

The results of the research showed that both frequency and intensity of the external electric field considerably influenced water coalescence in oil. However, intensity of the electric field can be increased to a certain extent due to a danger to obtain a breakdown. Besides, at a very high intensity the opposite effect, i.e. water dispersion, can occur, especially for focal intensity points. A higher frequency of the electric field from  $300 \text{ Hz}$  to  $300 \text{ Hz}$  made it possible to decrease a coalescence time by 10 times at the average. A higher frequency of over  $3 \text{ MHz}$  would not yield considerable results, as from  $300 \text{ Hz}$  to  $3 \text{ MHz}$  it was a saturation range.

The research gives practical recommendations for implementation of results. It was proved that the most efficient is application of an additional board purification system on a hydraulic tank; it consists of an electric device for water drop coalescence and serial moisture eliminator of coalescent drops.

The economic efficiency for application of the method proposed for removal of water from hydraulic oil by an example of a track machine ВІР-1200 showed that economic effect of application of a board eliminator was 185,500 hrn per operational year for the machine.

The findings obtained in the research into a longer service life for hydraulic units of track machines by improving electric purification techniques for removal of water from oil are also used in some Bachelor's and Master's curricula in Ukrainian State University of Railway Transport for such disciplines as Track Machines, Machine Operation, Basics of Machine Automation, Basics of Nanotechnologies, Machine Reliability, and Machine Repair.

Moreover, the method of a longer service life for hydraulic units of track machines by improving electric oil purification was implemented in production process in the Southern Railway subdivision for technical maintenance of track machines. It contributed to higher reliability of hydraulic drives and longer service life of hydraulic oils.

Key words: resource, hydraulic unit, track machine, electrical cleaning, corrosion wear, hydraulic oil.

#### Список публікацій здобувача

##### **Основні наукові праці:**

1. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю., Олійник А.В. Вплив частоти коливань електричного поля на процес коалесценції води в робочій рідині. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 142. С. 169-173.
2. Сафонюк І.Ю. Аналіз існуючих методів очистки нафтопродуктів від води. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 148. С. 121–127.
3. Сафонюк І.Ю. Вплив вмісту води у гідравлічній оливі на знос деталей

тертя засобів транспорту. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 159. С. 103–108.

4. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю., Онопрейчук Д.В., Стефанов В.О., Суранов О.О. Аналіз властивостей робочих рідин гідроприводів колійної техніки залізниць України. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 165. С. 90–98.

5. Воронін С.В., Скорик О.О., Сафонюк І.Ю. Вплив концентрації дрібнодисперсної води на механізм корозійно-механічного зношування гідравлічних агрегатів транспортних засобів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 178. С. 147–156.

**Публікації у виданнях України, що включені до міжнародних науко-метричних баз:**

6. A. Panchenko, A. Voloshina, S. Kiurchev, O. Titova, D. Onopreychuk, V. Stefanov, I. Safoniuk, V. Pashchenko, H. Radionov, M. Golubok. Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. Vol. 4. pp. 51-60. (Входить до НМБ Scopus).

**Праці апробаційного характеру:**

7. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю. Дослідження впливу електричного поля на процес коалесценції води в оливі. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Матеріали доповідей 76-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 143. С. 267-268.

8. Сафонюк І.Ю. Аналіз існуючих методів очистки нафтопродуктів від води. *Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті:* матеріали міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 80-річчю кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин. 26-28 листопада 2014 р. Харків: УкрДАЗТ, 2014. С. 31.

9. Сафонюк І.Ю. Вплив вмісту води у оливі на процес зношування деталей гідроагрегатів засобів транспорту. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад.*

*залізнич. трансп.:* тези доповідей 77-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» Харків: УкрДАЗТ, 2015. Вип. 151. С. 188-189.

10. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю. Дослідження коалесценції диспергованої води в гідравлічній оливі під впливом електричного поля. *Промислова гідравліка та пневматика:* матеріали конференції, присвяченої 50-річчю кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету 15–17 жовтня 2015 р. Суми: Сум. держ. ун-т, 2015. С. 49-50.

11. Онопрейчук Д.В., Сафонюк І.Ю. Вплив вмісту води в гідравлічних оливах на надійність машин інженерного озброєння: Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України / Національна академія Національної гвардії України (28 жовтня 2015 року) Харків: НАНГУ, 2015. С. 46.

12. Serhii Voronin ,Pavlo Konovalov , Ivan Safoniuk , and Oleksandr Kebko. The influence of external field on the lubricity of mineral oil for railway transport. MATEC Web of Conferences 116, 03004, 2017. (*Входить до НМБ Scopus*)

13. Воронін С.В., Скорик О.О., Сафонюк І.Ю. Підвищення строку служби прецизійних пар агрегатів гідравлічних приводів засобів транспорту шляхом застосування електроочистки гідравлічних олиг: Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів / Національна академія Національної гвардії України. (31 жовтня 2018 р.). Харків: НАНГУ, 2018. С. 147-148.

14. Скорик О.О., Сафонюк І.Ю. Підвищення ефективності виконання робіт колійними машинами за рахунок підвищення ресурсу гідравлічного приводу. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту:* матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції (16-17 травня 2019) Дніпро: ДНУЗТ, 2019. С. 246-247.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ	26
1.1 Аналіз якості роботи гідравлічного приводу в сучасних умовах експлуатації засобів транспорту	26
1.2 Вплив домішок різної природи у гідравлічних оливах на ресурс гідроагрегатів засобів транспорту	29
1.3 Аналіз існуючих методів та засобів підтримання чистоти гідравлічних олиव при експлуатації	40
1.4 Методи видалення дрібнодисперсної води з нафтопродуктів шляхом застосування зовнішніх електричних полів	48
1.5 Висновки до розділу 1	51
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ТА МЕТОДІВ ПРОВЕДЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	53
2.1 Дослідження стану та властивостей гідравлічних олив на засобах транспорту залізниці України	53
2.2 Загальна методика прогнозування ресурсу гідроагрегатів засобів транспорту	57
2.3 Методика дослідження фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей гідравлічних олив	63
2.4 Загальна методологія досліджень стану та руху води в гідравлічній оливі під дією зовнішніх силових полів	89
2.5 Методика та обладнання експериментальних досліджень коалесценції води в гідравлічній оливі	92
2.6 Висновки до розділу 2	94
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРГОВАНОЇ ВОДИ В ГІДРАВЛІЧНІЙ ОЛИВІ НА РЕСУРС АГРЕГАТІВ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ	95

3.1	Прогнозування ресурсу агрегатів гідравлічного приводу засобів транспорту за наявності води в гідравлічній оливі	92
3.2	Експериментальні дослідження стану гідравлічних олив засобів залізничного транспорту та впливу води на їх експлуатаційні властивості	105
3.3	Висновки до розділу 3	112
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ДИСПЕРГОВАНОЇ ВОДИ В ГІДРАВЛІЧНІЙ ОЛИВІ ПІД ВПЛИВОМ ЗОВНІШНІХ СИЛОВИХ ПОЛІВ		113
4.1	Теоретичні дослідження процесу коалесценції під дією зовнішніх силових полів	110
4.2	Експериментальні дослідження процесу коалесценції води в гідравлічній оливі	128
4.3	Висновки до розділу 4	136
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРООЧИСТКИ ГІДРАВЛІЧНИХ ОЛИВ		137
5.1	Практичні рекомендації щодо впровадження електроочистки гідравлічних олив	137
5.2	Техніко-економічна ефективність впровадження результатів дослідження	142
5.3	Висновки до розділу 5	143
ВИСНОВКИ		144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		147
ДОДАТОК А Приклад розрахунку економічної ефективності		161
ДОДАТОК Б Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації		182
ДОДАТОК В Акт впровадження у виробництво		186
ДОДАТОК Г Акт впровадження в навчальний процес		187

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АПН – аксіально-плунжерний насос;
- ГА – гідравлічний агрегат;
- ГО – гідравлічна олива;
- ГП – гідравлічний привід;
- ЕП – електричне поле;
- ЗТ – засоби транспорту;
- КМ – колійна машина;
- ОП – окисна плівка;
- ПАР – поверхнево активна речовина;
- ПММ – паливно-мастильні матеріали;
- ПП – прецизійна пара;
- РР – робоча рідина;
- ЧКМ – чотирьох кулькова машина тертя;

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сучасному етапі залізниці України мають у своєму складі велику кількість машин та обладнання з гідравлічним приводом (ГП), в якому робочим тілом є мінеральні гідравлічні оливи (ГО), а саме індустріальні, компресорні, турбінні та ін. Серед широкого спектра засобів транспорту (ЗТ) найбільш складну та розгалужену систему мають гідрофіковані колійні машини (КМ). Під час експлуатації КМ відбувається поступове забруднення і старіння ГО. Такі процеси призводять до підвищеного зносу клапанів, сідел, плунжерів та інших елементів ГП. Як правило, основними забруднювачами гідравлічних олив є механічні домішки та вода, кожен з яких по-своєму впливає на розвиток зношування деталей гідросистем. Вони призводять до потреби розробки і удосконалення методів очистки гідравлічних олив.

Методи очистки олив від механічних домішок, з точки зору їх енергоефективності, вивчені більш глибоко ніж методи очистки ГО від води. Так, наприклад, сучасні фільтрувальні елементи, що застосовуються в ЗТ, можуть затримувати частинки механічних домішок, навіть, мікронних розмірів, причому цей процес не потребує високих енергетичних витрат. З іншого боку, якщо мова йде про дрібнодисперсні краплі води, то їх видалення реалізується комбінованими методами, як правило, із нагріванням оливи, що потребує значних енерговитрат та далеко не завжди може бути реалізовано в експлуатаційних умовах. Саме тому актуальним завданням дисертаційного дослідження, з точки зору підвищення ресурсу прецизійних пар гідравлічних агрегатів (ГА) КМ, є удосконалення енергоефективних методів видалення дрібнодисперсної води з ГО та впровадження цих методів у експлуатаційних умовах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зі змінами від 16.10.2012,

№ 5460-VI; «Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року», розпорядження КМУ № 1555-р від 16.12.2009. Дослідження виконані в межах наукової роботи «Удосконалення, виготовлення та впровадження стаціонарної системи змащування рейок» № ДР 0114U005598, де здобувач був молодшим науковим співробітником, виконавцем.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин шляхом обґрунтування параметрів електричної очистки олив від дрібнодисперсної води. Для досягнення мети були визначені такі основні задачі дослідження:

1. Виконати аналіз факторів, які впливають на ресурс гідравлічних агрегатів колійних машин, існуючих методів видалення води із гідравлічних олив, вмісту води в оливах колійних машин залізниць України та, на цій основі, запропонувати загальну методику дисертаційного дослідження.

2. Виконати теоретичні дослідження впливу дрібнодисперсної води в гідравлічній оливі на ресурс гідравлічних агрегатів колійних машин.

3. Експериментальним шляхом встановити залежність впливу концентрації диспергованої води на ресурс гідравлічних агрегатів колійних машин та експлуатаційні властивості гідравлічних олив.

4. Виконати теоретичні дослідження впливу параметрів зовнішніх силових полів на процес очистки ГО від дрібнодисперсної води.

5. Експериментальним шляхом встановити залежність впливу параметрів електричного поля на інтенсивність процесу коалесценції дрібнодисперсної води як фактора ефективності очистки гідравлічної оливи.

6. На основі виконаного дослідження розробити практичні рекомендації щодо підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин шляхом удосконалення електроочистки олив в експлуатаційних умовах.

*Об'єкт дослідження* – процес технічної експлуатації гідравлічних агрегатів колійних машин.

*Предметом дослідження* – технологія підвищення ресурсу

гідравлічних агрегатів колійних машин.

**Методи дослідження.** Поставлені в дисертаційній роботі задачі вирішувались із застосуванням як загальнонаукових, так і спеціальних методів, у тому числі й авторських. При визначенні стану гідравлічних олив використовувались методи фізичного та хімічного аналізу, а також математичної статистики. При теоретичному обґрунтуванні математичної моделі прогнозування ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин використовувались положення механіки, фізичної хімії та трибології. При визначенні мінімального часу коалесценції дрібнодисперсної води в оливі під дією зовнішнього електричного поля використовувались положення колоїдної хімії та електростатики. Лабораторні та стендові випробування виконані із застосуванням апробованих методик на основі теорії моделювання і планування експерименту.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання підвищення ресурсу гідравлічного приводу колійних машин шляхом удосконалення енергоефективних методів видалення дрібнодисперсної води із гідравлічної оливи та впровадження цих методів у експлуатаційних умовах.

*Вперше* експериментальним шляхом отримана залежність для визначення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин, яка враховує концентрацію води в оливі;

*Удосконалена* математична модель прогнозування ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин, яка, на відміну від існуючої, враховує вплив концентрації дрібнодисперсної води в оливі на інтенсивність корозійно-механічного зношування;

*Набув подальшого розвитку* метод підвищення ресурсу гідравлічних агрегатів колійних машин, який базується на досягненні мінімального часу коалесценції дрібнодисперсної води в оливі під дією зовнішнього електричного поля.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичні результати

роботи полягають у тому, що розроблена методика реалізації енергозберігального процесу видалення дрібнодисперсної води із олив ГП КМ в експлуатаційних умовах.

Результати роботи впроваджено у виробничий процес регіональної філії «Південна залізниця» при технічній експлуатації колійних машин. Економічний ефект від експлуатації колійної машини ВПР-1200 складає 185 500 грн на рік. Також результати роботи впроваджено в навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці бакалаврів за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування з дисциплін «Колійні машини», «Експлуатація машин», «Основи автоматизації машин» та при підготовці магістрів за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування з дисциплін «Основи нанотехнологій», «Надійність машин», «Ремонт машин».

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами впровадження, які наведені в додатках до дисертаційної роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Роботи, виконані разом зі співавторами, наведені в переліку публікацій. З основних праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: в [69] сформульована теорія укрупнення крапель під дією електричного силового поля та виконано експериментальні дослідження впливу параметрів зовнішнього електричного поля на процес коалесценції води в оливі; у статті [134] наведені результати експериментальних досліджень експлуатаційних показників робочих рідин колійних машин Південної залізниці України, визначено долю впливу на експлуатаційні показники води та їх зміну після видалення води із олив; у статті [136] представлені теоретичні дослідження впливу води на процес зношування поверхонь тертя плунжер-гільза та результати експериментальних

досліджень впливу концентрації води на зношування моделі на машині тертя СМЦ-2; у статті [143] виконано аналіз стану робочих рідин при роботі мехатронних систем із гідравлічним приводом активних робочих органів самохідних машин; у [146] виконано дослідження впливу електричного поля на процес коалесценції води в оливі; у [149] досліджено процес коалесценції диспергованої води в гідравлічній оливі під впливом електричного поля; у [150] досліджено вплив вмісту води у оливі на надійність агрегатів машин інженерного озброєння; у [151] досліджено вплив зовнішнього електричного поля на робочі властивості мінеральних олив; у [152] досліджено переваги сформульованих методів підвищення строку служби прецизійних пар агрегатів гідравлічних приводів засобів транспорту шляхом застосування електроочистки гідравлічних олив; у [153] досліджено можливість підвищення ефективності виконання робіт колійними машинами за рахунок підвищення ресурсу гідравлічного приводу шляхом електроочистки гідравлічних олив.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати доповідалися та отримали схвалення на наукових конференціях та семінарах: 76-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 80-річчю кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті» (Харків, 2014 р.); 77-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, 2015 р.); конференції, присвяченій 50-річчю кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету «Промислова гідравліка та пневматика» (Суми, 2015 р.); конференції Національного університету цивільного захисту України «Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України» (Харків, 2015 р.); VI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності та



довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2017 р.); конференції Національного університету цивільного захисту України «Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів» (Харків, 2018 р.); 79-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2019 р.).

**Публікації.** Відповідно до теми дисертації опубліковано 14 наукових праць, з яких шість статей (дві без співавторів) опубліковано у фахових виданнях, затверджених МОН України (одну статтю включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), та вісім праць апробаційного характеру.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг тексту дисертації складає 187 сторінок, обсяг основного тексту складає 127 сторінок. Робота ілюстрована 42 рисунками, наведено 24 таблиці, список використаних джерел включає 153 найменування, 4 додатки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шашкин П.И., Брай И.В. Регенерация отработанных нефтяных масел : 2-е изд. Москва: Химия, 1970. 303 с.
2. Черножуков Н.И., Крейн С.Е. Окисляемость минеральных масел : 3-е изд., перераб. Москва: Госптехиздат, 1955. 372 с.
3. Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року», розпорядження КМУ № 1555-р від 16.12.2009. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1555-2009-p> (дата звернення 14.06.2019).
4. Добронравов С.С., Добронравов В.Г. Строительные машины и основы автоматизации. Москва: Высшая школа, 2001. 575 с.
5. Комисарик С.Ф., Ивановский Н.А. Гидравлические объемные трансмиссии. Москва: МАШГИЗ, 1963. 155 с.
6. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. Москва: Машиностроение, 1971. 672 с.
7. Данилкин И.Е., Башарин А.И., Ершова К.Б. Устройство и эксплуатация рихтовочных и выправочных машин. Учебник для средних проф.-техн. училищ ж.-д. трансп. ; под ред. И.Е. Данилкина. Москва: Транспорт, 1986. 205 с.
8. Соломонов С.А. Путевые машины. Учебник для вузов ж.-д. трансп. ; под ред. С.А. Соломонова. Москва: Желдориздат, 1976. 564 с.
9. Путевые машины. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / С.А. Соломонов, М.В. Попович, В.М. Бугаенко и др. ; под ред. С.А. Соломонова. Москва: Желдориздат, 2000. 756 с.
10. Выправочно-подбивочно-отделочная машина ВПО-3000М. Руководство по эксплуатации. РЖД, 2007. 113 с.
11. Соломонов С.А. Путевые машины. 2-е изд. Москва: Транспорт, 1985. 376 с.
12. Путевые машины / М.В. Попович, М.В. Бугаенко, Б.Г. Волковойнов и др.; под. ред. М.В. Поповича, В.П. Бугаенко. Москва:

ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 820 с.

13. Лисіков Є.М., Шуліка О.С. Роль продуктів зносу трибосполучень гідроприводів в умовах обробки робочої рідини електростатичним полем. Техніка та технологія виконання будівельних, колійних та перевантажувальних робіт на транспорті. Харків: УкрДАЗТ, 2004. № 58. С. 54–58.

14. Мамонова М.В., Прудников В.В., Прудникова И.А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 400 с.

15. Коваленко В.П., Турчаников В.Е. Очистка нефтепродуктов от загрязнения. Москва: Недра, 1990. 160 с.

16. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприборы Москва: Машиностроение, 1982. 423 с.

17. Джост Х.П. Прошлое и будущее трибологии. *Трение и износ*. 1990. Т.11, №1. С. 149-160

18. Руднев В.К., Лысиков Е.Н., Венцель Е.С. Повышение эксплуатационной надежности гидроприводов строительных и дорожных машин. Киев, 1989. 136 с.

19. Чабаний В.Я. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення. Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2008. 357 с.

20. Киселев М.М. Топливо смазочные материалы для строительных и дорожных машин. Москва: Стройиздат, 1988. 270 с.

21. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др., 2-е изд., под ред. В.М. Школьников. Москва: Издательский центр «Техинформ», 1999. 596 с.

22. Кузнецов А.В. Топливо и смазочные материалы. М.: Колос, 2007. 199 с.

23. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
24. Закалов О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин. Тернопіль: ТДТУ, 2000. 354 с.
25. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
26. Богданов В.С. Исследования воды и механических примесей в маслах на трибологические свойства поверхностей трения деталей : дис. д-ра техн. наук. : 05.20.03 Москва: Вестник ФГОУ ВПО МГАУ №3, 2012. 333 с.
27. Хайнике Г. Трибохимия. Москва: Мир 1987. 584 с.
28. Гаркунов Д.Н. Трибо техника. Износ и безызносность. 4-е изд., - Москва: МСХА, 2001. 616 с.
29. Поляков А.А. О механизме водородного износа. Исследование водородного износа. М.: Наука, 1977. 431 с.
30. Попеско А.И., Ступин А.В., Чесноков С.А. Износ технологических машин и оборудования при оценке их рыночной стоимости. Москва : Российское общество оценщиков, 2002. 241 с.
31. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. 2-е изд., Ленинград: Химия, 1984. 368 с.
32. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Москва : Химия, 1988. 464 с.
33. Jim Fitch. How Water Causes Bearing Failure. *Machinery Lubrication*. 2008. N 7.
34. Drew Troyer. Removing Water Contamination. *Machinery Lubrication*. 2001. N5.
35. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. 2-е изд., Москва : Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
36. Руднев В.К., Венцель Е.С., Лысиков Е.Н. Эксплуатационные материалы для строительных и дорожных машин. Киев, 1993. 238 с.

37. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин. Москва: Машиностроение, 1970. 312 с.

38. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справ. Изд./ К.М. Бадыштова, Я.А. Берштадт, Ш.К. Богданов и др., под ред. В.М. Школьников, Москва: Химия, 1989. 432 с.

39. Крейн С.Э. Ингибированные масла. под ред. С.Э. Крейна, Москва: ЦНИИТЭнефтегаз, 1964. 89 с.

40. Иванов К.И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления углеводородов. Под ред. Черножукова Н.И., Москва: Ленинград, ГОСТОПТЕХИЗДАТ 1949. 192 с.

41. Черножуков Н.И., Крейн С.Е., Лосиков Б.В. Химия минеральных масел. 2-е изд., Москва: Госптехиздат, 1959. 416 с.

42. Бах А.Н. Собрание трудов по химии и биохимии. Москва: ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР, 1950. 684 с.

43. Thomas R. Lynch. Process Chemistry of Lubricant Base Stocks. Chemical industries series / Taylor & Francis Group, 2008. 371 p.

44. Лосиков Б.В., Пучков Н.Г., Энглин Б.А. Основы применения нефтепродуктов. 2-е изд., Москва : Госптехиздат, 1959. 480 с.

45. Некрасов Ю.Г., Романова Е.В., Елисеева О.А. Основы химмотологии автомобильных топлив и масел. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. 129 с.

46. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей. Е.Е. Александров, И.А.Кравец, Е.Н.Лысиков, Е.П.Масюткин, В.И.Просвирнин, О.В.Соловьев, А.А.Тропина Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. 544 с.

47. Логинов В.И. Обезвоживание и обессоливание нефтей. Москва : Химия, 1979. 215 с.

48. Абрамзон А.А. Поверхностно активные вещества. Свойства и применения. Ленинград : Химия, 1981. – 304 с.

49. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения. Д.Н. Левченко и др. Москва : Химия, 1967. 200 с.
50. Брай И. В. Регенерация трансформаторных масел. 2-е изд. Москва: Химия, 1972. 168 с.
51. Григорьев М.А., Покровский Г.П. Автомобильные и тракторные центрифуги. Москва : Машгиз, 1961. 183 с.
52. Пузік С.О., Манзій В.С., Закревський В.О., Шевчук В.С. Процес промивання гравітаційного очисника від забруднень мийними засобами. *Вісник НАУ*. – Київ : НАУ, 2010. № 1. С. 54–`57.
53. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗУ, Головне санітарно-епідеміологічне управління, 1999. 34 с.
54. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. Москва: Физматгиз, 1959. 700 с.
55. Киреев В.А. Курс физической химии. Москва : ГОСХИМИЗДАТ, 1955. 832 с.
56. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Кузовников Ю.М. Разрушение масляной эмульсии ультразвуковым воздействием. Бийский технологический институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, кафедра Методов и средств измерений и автоматизации. – Россия, г. Бийск, 2008. 167 с.
57. Ультразвуковая технология. под ред. Б.А. Аграната. Москва: Металлургия, 1974. 505 с.
58. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга, Москва: Наука, 1970. 685 с.
59. Кумченко Я.А. Сила Бьеркнеса-Умова-Лебедева (БУЛ) в резонаторно-резонансном механизме очистки углеводородных и биотоплив от вредных примесей. Київ : Вісник НАУ, 2008. № 1. С. 33–35.
60. Трофимов В. В. Обезвоживание нефти и очистка сточных вод. Москва : Недра, 1971. 262 с

61. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. Пер. с англ. А. Л. Клячко, И. Л. Клячко, В. И. Якерсона, Москва : Мир, 1976. 781 с.
62. Соколов В.А., Торочешников Н.С., Кельцев Н.В. Молекулярные сита и их применение. Москва : Химия, 1964. 156 с.
63. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. 2-е изд., Москва : Химия, 1984. 592 с.
64. Соколов В.А., Торочешников Н.С., Кельцев Н.В., Молекулярные сита и их применение. Москва : Химия, 1964. 154 с.
65. Richard M. Barrer. Diffusion in and through solids. Richard M. Barrer, Cambridge, 1951. 464 p.
66. Дау Д. Нефтяные эмульсии. / пер. с англ., под. ред. Добрянского А.Ф., Москва : Химия, 1928. 126 с.
67. Технологические расчеты установок переработки нефти [Текст] / М.А. Танатаров, М.Н. Ахметшина, Р.А. Фасхутдинов и др., Москва : Химия, 1987. 352 с.
68. Мартыненко А. Г., Коноплев В.П., Ширяева Г.П. Очистка нефтепродуктов в электрическом поле постоянного тока. Москва : Химия, 1974. 87 с.
69. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю., Олійник А.В. Вплив частоти коливань електричного поля на процес коалесценції води в робочій рідині. Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Харків : УкрДАЗТ, 2013. Вип. 142. С. 169–173.
70. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем. Москва : Издательский центр «Академия», 2009. 208 с.
71. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. Москва : Машиностроение, 1986. 248 с.
72. Шейнин А.М., Шейнин В.А. Алгоритмы и программы решения оптимальных задач надежности машин. Москва : МАДИ, 1981. 112 с.
73. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения Москва : Физматгиз, 1963. 471 с.
74. Лысиков Е.Н., Косолапов В.Б., Воронин С.В. Надмолекулярные

структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем Харьков : ЭДЭНА, 2009. 273 с.

75. Савельев И.В. Курс общей физики: в 2 т. Москва : Наука, 1982. Т.2: Электричество и магнетизм. 480 с.

76. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике Москва : Наука, 1985. 512 с.

77. Serhii Voronin, Pavlo Konovalov, Ivan Safoniuk, Oleksandr Kebko. The influence of external field on the lubricity of mineral oil for railway transport. MATEC Web of Conferences 2017, Vol. 116, Art. 03004, 6 p.

78. Чичинадзе А.В. Основы трибологии. Москва : Машиностроение, 2001. 664 с.

79. Крагельский И.В. Трение и износ. 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 1968. 480 с.

80. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.

81. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей Москва : Издательство АН СССР, 1962. 113 с.

82. Сафонюк І.Ю. Вплив вмісту води у гідравлічній оливі на знос деталей тертя засобів транспорту. Харків: Зб. наук. праць УкрДУЗТ 2016. Вип. 159. С. 103–108.

83. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях Киев :Техника, 1975. 168 с.

84. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. Москва : Машиностроение, 1985. 232 с.

85. Духин С.С., Экстрела-Льонис В.Р., Жолновский Э.Г. Электроповерхностные явления и электрофильтрация. Киев: Наукова думка, 1985. 288 с.

86. Духин С.С., Дерягин В.В. Электрофорез Москва : Наука, 1979.



392 с.

87. Федыня В. П., Зубченко А. Н. Влияние формы и материала рабочих электродов на эффективность работы электросепаратора жидких диэлектриков. *Исследование процессов подготовки, применения и контроля качества авиационных ГСМ и спецжидкостей*. Киев : КИИГА, 1988. С. 88–92.

88. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2006. 278 с.

89. Лашхи В.Л., Фукс И.Г., Шор Г.И. Коллоидная химия смазочных масел. *Химия и технология топлив и масел*. 1991. № 7. С. 16–20.

90. Вьюцкий С.С. Курс коллоидной химии. 2-е изд. Москва : Химия, 1975. 512 с.

91. Пасынский А.Г. Коллоидная химия. Москва : Высшая школа, 1959. 267 с.

92. Гаммет Л. Основы физической органической химии / перевод с английского, Москва : Мир, 1972. 525 с.

93. Никольский Б.П. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство. 2-е изд., под ред. Б.П. Никольского, - Ленинград : Химия, 1987. 880 с.

94. Джосон К. Механика контактного взаимодействия / перевод с английского, Москва : Мир, 1989. 510 с.

95. Фишер М. Природа критического состояния / перевод с английского М.Ш. Гитермана, Москва : МИР, 1968. 222 с.

96. Седлуха Г.А., Гельцер А.К., Будагов Ф.К. Повышение долговечности гидропривода землеройных машин. Ленинград : ПД НТП, 1976. 32 с.

97. Повышение износостойкости элементов гидропривода и сроков службы масел путем дозированного ввода в них легирующих присадок и сорбентов. Методические рекомендации / Л. Н. Альбощая, М. А. Альтшулер, З. С. Апосталюк и др. Москва : ВНИИТЭМР, 1986. 20 с.

98. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика : учебное пособие, Г.А. Аврунин, И.В. Грицай, И.Г. Кириченко, И.И. Мороз,

О.В. Щербак, Харьков : ХНАДУ, 2008. 412 с.

99. Руднев В.К, Руднев К.В. Повышение ресурса гидроагрегатов строительных и дорожных машин. Орел: ОрелГТУ, 2001. 184 с.

100. Правила поточного ремонту та утримання вантажопідіймальних кранів на залізничному ходу 105.86000.94103 / Міністерство транспорту України. Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2004. 49 с.

101. Путевые машины и механизмы. Отраслевой каталог 18-3-82 / Москва : ЦНИИ информации и технико-экономических исследований по тяжелому и транспортному машиностроению, 1982. 87 с.

102. Беркман И.Л., Раннев А.В., Рейш А.К. Универсальные одноковшовые строительные экскаваторы. Москва : Высшая школа, 1977. 384 с.

103. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526 с.

104. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин справочник. Москва : Машиностроение, 1984. 481с.

105. Грозин Б.Д. Износ металлов. Киев : Гостехиздат, 1951. 252с.

106. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах Киев: Техника, 1977. – 396 с.

107. Крагельский И.В. Трение и износ. Москва : Машгиз, 1962. 382 с.

108. Мур Д. Основы и применения трибоники / перевод с английского, под ред. И.В. Крагельского, Ленинград : Мир, 1978. 488 с.

109. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. Москва : Наука, 1972. 171 с.

110. Зорин И.А., Корнев С.В., Финагин К.В. Влияние окисления базовых минеральных моторных масел на трибологические характеристики. *Омский национальный вестник*. Омск : ОГТУ, 2012. Вып. 107, №1. С. 330-333.

111. Одабашян Г.В., Швец В.Ф. Лабораторный практикум по химии и технологии основного органического и нефтехимического синтеза. 2-е изд.,

Москва : Химия, 1992. 240 с.

112. Руководство к практическим работам по коллоидной химии / 2-е изд., О.Н. Григоров, И.Ф. Карпова, З.П. Козьмина, К.П. Тихомолова, Д.А. Фридрихсберг, Ю.М. Чернобережский, М.-Л.:Химия, 1964, 327 с.

113. Фролов Ю.Г. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / под ред. Ю.Г. Фролов и А.С. Гродского, Москва : Химия, 1986. 216 с.

114. Попеско А.И., Ступин А.В., Чесноков С.А. Износ технологических машин и оборудования при оценке их рыночной стоимости. Москва : ОО «Российское общество оценщиков», 2002. 241 с.

115. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 2 Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. Москва : Машиностроение, 1990. 416 с.

116. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1 Теоретические основы. Москва : Машиностроение, 1989. 400 с.

117. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения : справочное пособие, Москва : Машгиз, 1962. 222 с.

118. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / под ред. В.А. Белого, К. Лудеми, Н.К. Мышкина, Москва : Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. 453 с.

119. Триботехническое материаловедение и триботехнология / Н.Е. Денисова, В.А. Шорин, И.Н. Гонтарь, Н.И. Волчихина, Н.С. Шорина, под ред. Н.Е. Денисовой, Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 248 с.

120. Огородников С.В. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т. 1 / под ред. С.К. Огородникова, Ленинград: Химия, 1978. 496 с.

121. Огородников С.В. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т. 2 / под ред. С.К. Огородникова, Ленинград : Химия, 1978. 592 с.

122. Химия нефти и газа. 3-е изд., А.И. Богомолов, А.А. Гайле, В.В. Громова и др., под ред. В.А. Провкурякова, А.Е. Драбкина, СПб : Химия, 1995. 448 с.

123. Астахов А.В., Широков Ю.М. Электромагнитное поле. 2 том, Москва : Наука, 1980. 360 с.
124. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. Москва : Высшая школа, 1983. 463 с.
125. Солимар Л. Лекции по электрическим свойствам материалов / перевод с английского, под ред. С.И. Баскакова, Л. Солимар, Д. Уолш, Москва : Мир, 1991. 504 с.
126. Уиткер Э. История теории эфира и электричества / Э. Уиткер, Ижевск:НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 512 с.
127. Парселл Э. Электричество и магнетизм. Т. 2. Беркли, США: Калифорнийский университет, 1971. 444 с.
128. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2: Теория поля / 6-е изд., М.: Наука, 1973. 509 с.
129. Минкин В.И., Симкин Б.Я., Миняев Р.М. Теория строения молекул / 2-е изд., Ростов-на-Дону: ФЕНИКС, 1997. 558 с.
130. Грин М. Поверхностные свойства твердых тел / перевод с английского, под ред. М. Грина, Москва : Мир, 1972. 432 с.
131. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела / 3-е изд, П.В. Павлов, Москва : Высшая школа, 2000. 494 с.
132. Ребиндер П.А. Физико-механическая механика. Москва : Наука, 1979. 831 с.
133. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. Москва : Наука, 1987. 520 с.
134. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю., Онопрейчук Д.В., Стефанов В.О., Суранов О.О. Аналіз властивостей робочих рідин гідроприводів колійної техніки залізниць України. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків : УкрДУЗТ, 2016. Вип. 165. С. 90–98.
135. Сафонюк І.Ю. Аналіз існуючих методів очистки нафтопродуктів від води. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ.* Харків : УкрДАЗТ, 2014. Вип. 148. С. 121–127.

136. Воронін С.В., Скорик О.О., Сафонюк І.Ю. Вплив концентрації дрібнодисперсної води на механізм корозійно-механічного зношування гідравлічних агрегатів транспортних засобів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків : УкрДУЗТ, 2018. Вип. 178. С. 147–156.

137. Лисіков Є.М., Воронін С.В. Експлуатаційні випробування аксіально-поршневих насосів в умовах обробки робочих рідин зовнішнім електростатичним полем. *Техніка та технологія виконання будівельних, колійних та перевантажувальних робіт на транспорті.* Харків: УкрДАЗТ. 2004. № 58. С. 58–62.

138. Berglund K., Marklund P., Larsson R. Lubricant ageing effects on the friction characteristics of wet clutches *Proceedings. Part J : Journal of Engineering Tribology.* 2010. N 7. P. 639–647.

139. Williamson W., Rhodes B. Effects of water on cellulose-based frictional surfaces in automatic transmission clutch plates. *SAE Special Publications,* 1996. P. 79–86.

140. Fatima, N., Marklund, P., Larsson, R. Water contamination effect in wet clutch system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering.* 2012., N 3. P. 376–389.

141. Yanliang Huang, Xiaoxia Jiang, Sizuo Li. Pure mechanical wear loss measurement in corrosive wear. *Bulletin of Materials Science,* January 2000, Volume 23, Issue 6. P 539–542.

142. Оценка экономической эффективности инвестиций в мероприятия научно-технического прогресса: Учебно-методическое пособие / под ред. В. Л. Диканя. Харьков : Основа, 1995. 76 с.

143. Panchenko A., Voloshina A., Kiurchev S., Titova O., D. Onopreychuk, Stefanov V., Safoniuk I. Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. Vol. 4. P. 51-60.

144. Методические рекомендации по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-

технического прогресса: Госкомитет СССР по науке и технике. Москва: 1988. 250 с.

145. Основы организации, экономики и прогнозирования производства : учебное пособие / В.Л. Дикань, И. Г. Бойко, Е.И. Балака и др.; Под ред. В. Л. Диканя. Харьков : Основа, 1995. 160 с.

146. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю. Дослідження впливу електричного поля на процес коалесценції води в оливі. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Матеріали доповідей 76 міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип.143. С. 267-268.

147. Сафонюк І.Ю. Аналіз існуючих методів очистки нафтопродуктів від води. Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 80-річчю кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті» м. Харків, 26-28 листопада 2014 р. УкрДАЗТ, 2014. С. 31.

148. Сафонюк І.Ю. Вплив вмісту води у оливі на процес зношування деталей гідроагрегатів засобів транспорту. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Тези доповідей 77-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» м. Харків, УкрДАЗТ, 2015. Вип. 151. С. 188-189.

149. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю. Дослідження коалесценції диспергованої води в гідравлічній оливі під впливом електричного поля. Промислова гідравліка та пневматика. Матеріали конференції присвячується 50-річчю кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету. м. Суми, 15–17 жовтня 2015 р. Сум. держ. ун. Суми. : 2015. С. 49-50

150. Онопрейчук Д.В., Сафонюк І.Ю. Вплив вмісту води в гідравлічних оливах на надійність машин інженерного озброєння. Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України. Національна академія Національної гвардії

України (28 жовтня 2015 року) Харків 2015. С. 46.

151. Serhii Voronin ,Pavlo Konovalov , Ivan Safoniuk , and Oleksandr Kebko. The influence of external field on the lubricity of mineral oil for railway transport. MATEC Web of Conferences 116, 03004, 2017. (Входить до НМБ Scopus)

152. Воронін С.В., Скорик О.О., Сафонюк І.Ю. Підвищення строку служби прецизійних пар агрегатів гідравлічних приводів засобів транспорту шляхом застосування електроочистки гідравлічних оливи/ Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів Національна академія Національної гвардії, 31 жовтня 2018 р. України. Харків, 2018. С. 147-148.

153. Скорик О.О., Сафонюк І.Ю. Підвищення ефективності виконання робіт колійними машинами за рахунок підвищення ресурсу гідравлічного приводу /Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту/ матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 16-17 травня 2019 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2019. С. 246-247.