DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)-178-189
УДК 621.89.098:537.52

Сергій Зайцев

кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)
E-mail: sdjavdet@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1166-3243

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОЛИВ ПІД ВПЛИВОМ АКУСТИЧНОЇ КАВІТАЦІЇ

Стаття є публікацією науково-методичного характеру. У роботі розглянуто результати удосконалення методу визначення деградації енергетичних олив під впливом акустичної кавітації. Метою дослідження є підвищення надійності результатів визначення впливу акустичної (ультразвукової) кавітації на деградацію енергетичних олив. Предмети досліджень: турбінні оливи «Азмол Тп-22с», «Агрінол Тп-22», «Тп-30», «Reolube®OMTI» (на основі трикселенілфосфатів), компресорна олива «ХФ-12-16». В роботі удосконалено принципову схему установки для дослідження впливу акустичної (ультразвукової) кавітації на деградацію енергетичних олив, що дозволяє виконувати дослідження при потужності ультразвукового випромінювача 20 Вт з частотами до 125 кГц. Під час дослідження вмісту повітря (або водню) в турбінних оливах під впливом на них ультразвукової кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив, показано, що при температурі 20 ^{0}С ці турбінні оливи містять у собі повітря (або водень) у вигляді емульсії із загальним вмістом відповідного газу (повітря або водню) не більше ніж 15 % об'ємних. Під час дослідження впливу ультразвукової кавітації на деградацію енергетичних олив встановлено, що під впливом ультразвукової кавітації в енергетичних оливах: генеруються та розчиняються в них гази C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2; генеруються тверді частки вуглецю; вміст присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» знижується. Встановлено наявність H_2S або SO_2 в газових потоках над мінеральними турбінними оливами, та наявність PH_3 в газових потоках над синтетичною вогнестійкою турбінною оливою (на основі трикселенілфосфатів) під впливом на ці турбінні оливи ультразвукової кавітації. Для досліджених енергетичних олив в інтервалі температур 10–100 ^{0}С: підвищення температури призводить до зниження значень кінематичної в'язкості; ультразвукове опромінювання призводить до зниження значень кінематичної в'язкості.

Ключові слова: *енергетичні оливи; мінеральні турбінні оливи; синтетична вогнестійка турбінна олива; мінеральна компресорна олива; газова хроматографія; розчинені гази; акустична кавітація; присадки в енергетичних оливах; кінематична в'язкість.*

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. Стаття є публікацією науково-методичного характеру. В обладнанні атомних електростанцій (АЕС) широко застосовують енергетичні оливи (ЕО), які забезпечують надійну експлуатацію оливонаповненого енергетичного обладнання [1; 2]. У тепломеханічному обладнанні енергоблоків АЕС України використовують мінеральні або синтетичні вогнестійкі турбінні оливи [3]. Мінеральні компресорні оливи застосовують у холодильних машинах, наприклад, для осушення циркуляційного потоку водню під час його охолодження в системі водневого охолодження турбогенераторів [4]. ЕО для відповідного оливонаповненого тепломеханічного обладнання постійно удосконалюються [3]. Під час експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні у процесі дії вібрації на це обладнання, ЕО підлягають безперервній деградації за рахунок виникнення акустичної кавітації в цих оливах з утворюванням в них розчинених газів CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, H_2, CO, CO_2 [5]. Таким чином, є необхідність у виконанні досліджень, які спрямовані на розвиток та удосконалення методів визначення характеру деградації ЕО під впливом акустичної, у тому числі ультразвукової (УЗ), кавітації [5; 6]. Це може дозволити застосувати існуючі або розробити нові діагностичні моделі для діагностування оливонаповненого обладнання АЕС, наприклад, за результатами контролю в ЕО вмісту розчинених газів або присадок та швидкості змінювання їх концентрацій [7; 8].

Постановка проблеми. Вібрації у вузлах оливонаповненого обладнання призводять до виникнення в них акустичних коливань, які у свою чергу можуть бути джерелом акустичної кавітації в ЕО, що циркулюють в цих вузлах. Основними видами оливонаповненого обладнання в структурі АЕС є: електродвигуни головних циркуляційних насосів ядерного реактора та оливонасоси цих електродвигунів; системи циркуляційного оливопостачання турбогенераторів (ТГ) з оливонасосами; оливонасоси системи змащення резервної дизель-електричної станції АЕС; оливонасоси системи продувки-підживлення

© Сергій Зайцев, 2024

першого контуру АЕС; оливонасоси низькотемпературних повітророзподільних установок у складі устаткування АЕС; установки для термічного та термовакуумного оброблення енергетичних олив; компресори холодильних установок. Таким чином є необхідність у постійному удосконаленні методів визначення впливу акустичної кавітації на деградацію ЕО, в тому числі турбінних та компресорних олив, для подальшого діагностування стану цих ЕО. Це дозволить розробити технічні заходи для недопущення такої деградації або для зниження її впливу на якість ЕО у процесі їх експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні АЕС, та підвищити надійність, наприклад, ТГ із водневим або повітряним охолодженням, або компресорів [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] наведено результати досліджень та розрахунків значень густини ρ та кінематичної в'язкості ν для мінеральної турбінної оливи «Азмол Тп-22с» в інтервалі температур 10–90 ^{0}С. Аналогічні результати досліджень для синтетичної вогнестійкої турбінної оливи «Reolube®OMTI» (на основі трикселенілфосфатів), відсутні.

У роботі [3] наведено результати досліджень впливу електричних розрядів на деградацію сучасних мінеральної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» та синтетичної вогнестійкої турбінної оливи «Fyrquel®L» залежно від вмісту в них води та утворюванням в них розчинених газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, H_2S, SO_2, PH_3. При цьому під час таких електричних розрядів у турбінних оливах виникають акустичні коливання, що може призвести виникнення акустичної кавітації в цих оливах та додатково впливати на їх деградацію [5].

У роботі [9] викладено метод визначення нормованої УЗ газостійкості ізоляційних рідин для визначення порівняльної стійкості ізоляційних рідин до газоутворення під дією енергії УЗ поля. При цьому під час виконання розрахунків як генеровані розчинених компоненти в ізоляційних рідинах здебільшого використовують C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, C_3H_6, C_3H_8, H_2, CO, CO_2, O_2, N_2, концентрації яких визначають за методами газової хроматографії (ГХ) [10; 11].

У роботі [12] викладено методику визначення вмісту присадок «Іонол», «В-15/4», «Д-157» в ЕО методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ).

В роботі [4] наведено газову схему водневого охолодження турбогенераторів, технологічну схему оливопостачання ущільнень валу кільцевого типу турбогенераторів єдиної серії потужністю 60–300 МВт та конструктивні схеми найбільш поширених ущільнень валу турбінною оливою, в яких можливий розвиток вібрацій та виникнення кавітації в турбінних оливах.

У роботі [13] наведено методику визначення стабільності кінематичної в'язкості (відносного зниження кінематичної в'язкості) після опромінення мінеральної оливи АМГ-10 з використанням УЗ установки протягом 50 хвилин. Ця олива призначена як робоча рідина для гідравлічних пристроїв. Метод застосовується для умовної оцінки схильності цієї оливи до зниження кінематичної в'язкості за рахунок механічного руйнування (деструкції) полімерних присадок в умовах експлуатації. Сутність методу полягає у визначенні відносного зниження кінематичної в'язкості оливи після опромінення її за заданих умов на УЗ установці. Імовірно, цей метод може бути також застосовано до визначення стабільності кінематичної в'язкості після опромінення мінеральних і вогнестійких синтетичних турбінних олив (на основі трикселенілфосфатів) з використанням УЗ установки.

У роботах [14; 15] наведено, що мінеральні турбінні оливи використовують як інформаційне середовище, у якому присутність діагностичних компонентів (вода; присадка «Іонол»; механічні домішки) характеризує наявність в обладнанні дефектів в зонах поверхонь тертя під впливом точкової дії високих температур, вібрації, електричних струмів, водневого зношування. При цьому застосовано вже існуючі діагностичні моделі [8; 16].

У роботі [17] наведено результати експериментального та розрахункового дослідження впливу домішок наночасток Al_2O_3 на значення в'язкості, тиску насичених парів, поверхневого натягу розчинів холодоагенту «R600a – мінеральна олива». Вперше для опису отриманих експериментальних даних та прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів в широкому інтервалі параметрів стану була застосована модель «SP-QSPR (Skaling Principles - Quantitative Structure-Property Relationship)». Показано, що домішки наночасток у розчинах «холодильний агент – мінеральна олива» сприяють збільшенню в'язкості й тиску насичених парів, зменшенню поверхневого натягу. Зазначені ефекти повинні враховуватися при оцінці перспективності застосування нанотехнологій в холодильному обладнанні. Можна очікувати, що отримані результати можна застосувати під час експлуатації турбінних олив.

Наведена інформація в літературних джерелах [1–17] вказує на неповноту відомостей про вплив акустичної кавітації на деградацію мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив. Усе це вимагає проведення відповідних досліджень із залученням сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив, що знаходяться в експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні АЕС в Україні.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявності вже відомих результатів досліджень впливу акустичної кавітації на деградацію ЕО, удосконалення методів визначення впливу акустичної кавітації на деградацію сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив є необхідністю для діагностування стану цих ЕО та розробки заходів для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість ЕО в процесі їх експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні АЕС.

Мета статті. Головною метою статті є підвищення надійності результатів визначення впливу акустичної кавітації на деградацію мінеральних ЕО та вогнестійких синтетичних турбінних олив на основі трикселенілфосфатів.

Завдання дослідження: 1) удосконалення принципової схеми установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО; 2) дослідження: а) генерування розчинених газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2 та твердих часток вуглецю в турбінних оливах та в мінеральній компресорній оливі для холодильних машин під впливом на них УЗ кавітації; б) вмісту повітря (або водню) в турбінних оливах під впливом на них УЗ кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив; в) характеру деградації присадок у мінеральних ЕО під впливом на них УЗ кавітації; г) наявності H_2S або SO_2 в газових потоках над мінеральними турбінними оливами під впливом на них УЗ кавітації, та наявності PH_3 в газових потоках над вогнестійкою синтетичною турбінною оливою (на основі трикселенілфосфатів) під впливом на неї УЗ кавітації; д) значень кінематичної в'язкості для ЕО в інтервалі температур 10–100 ^{0}C під впливом на них УЗ кавітації.

Виклад основного матеріалу. Об'єкти досліджень: методи визначення впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО при потужності УЗ випромінювача 20 Вт з частотами до 125 кГц. Предмети досліджень: а) мінеральні турбінні оливи «Азмол Тп-22с», «Агрінол Тп-22» та «Тп-30», вогнестійка синтетична турбінна олива «Reolube®OMTI» (на основі трикселенілфосфатів), що містять у собі розчинені гази C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, та розчинену або вільну (емульсійну) воду; б) мінеральна компресорна олива «ХФ-12-16» для холодильних машин, що містить у собі: антиокислювальну присадку «Іонол»; розчинені гази C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, та тверді частки мідного порошку марки ПМС-Н за його вмістом 0,5 % маси та розмірами часток менше, ніж 224 мкм [18]; в) суміші присадок в мінеральних енергетичних оливах: «Іонол» (антиокислювальна присадка), «В-15/41» (антиржавійна присадка), «Д-157» (деемульгуюча присадка); г) потоки водню або повітря, що містять в собі гази C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, H_2S, PH_3, SO_2, та знаходяться над поверхнею відповідної турбінної оливи.

При виконанні досліджень було використано:

1. Засоби вимірювальної техніки: а) газовий хроматограф «Кристал-2000М» для визначення вмісту розчинених газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2 в турбінних оливах [10; 11], та присадки «Іонол» в мінеральних ЕО [19]; б) індикаторні трубки типу «SPH-1L» (діапазон вимірювань 0,05–2,5 ppm для PH_3) – для визначення вмісту PH_3 в газових потоках [20], та «Dräger-Tube» (діапазон вимірювань: 0,2–5 ppm для H_2S та 0,1–3 ppm для SO_2) – для визначення вмісту H_2S та SO_2 в газових потоках [21] (до опромінювання турбінних олив УЗ коливаннями, гази H_2S, SO_2, PH_3 у газових фазах над поверхнею цих турбінних олив відсутні); в) рідинний мікроколоночний хроматограф «Міліхром» для визначення вмісту присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» в мінеральних ЕО [22]; г) удосконалену установку для визначення кінематичної в'язкості ν [6] ЕО за вимогами [23]; д) кулонометричний титратор «DL-32» – для визначення вмісту води у відповідних ЕО за методом К. Фішера [24]; е) пристрій для прискорення досягнення рівноваги з обертовим барабаном для розміщення в ньому шприців об'ємами до 50 $см^3$ з аналізованими пробами ЕО і газоподібними екстрагентами для встановлення фазових рівноваг у системах «ЕО – екстрагент (газоподібний аргон (Ar)» [5]; є) градуйовані газоподібні суміші H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CO, CO_2 в газоподібному Ar.

2. Методи: а) ГХ – для визначення вмісту розчинених газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2 [10; 11] та присадки «Іонол» [19] у відповідних ЕО; б) ВЕРХ – для визначення вмісту присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» в мінеральних ЕО [12; 22]; в) кулонометричного титрування – для визначення вмісту води у відповідних ЕО за методом К. Фішера [24]; г) колориметричного визначення вмісту PH_3, H_2S, SO_2 в газових потоках із застосуванням відповідних індикаторних трубок [20; 21]; д) визначення кінематичної в'язкості рідких нафтопродуктів, прозорих і непрозорих рідин вимірюванням часу витікання певного об'єму рідини під дією сили тяжіння через калібрований скляний капілярний віскозиметр [23].

При визначенні вмісту розчинених газів в енергетичних оливах використано: статичний варіант методу ГХ вимірювань із застосуванням газоподібного екстрагента і відповідних варіантів методик аналізів рівноважної газової фази в системах «ЕО – розчинений компонент – газоподібний екстракт»; метод абсолютного градуювання при визначенні вмісту компонентів в газоподібних екстрактах з використанням відповідних газоподібних градуювальних сумішей [10; 11]. Умови виконання ГХ досліджень під час визначення вмісту розчинених газів в ЕО відповідають вимогам [10; 11]. При дослідженні вмісту PH_3, H_2S, SO_2 в газових потоках під впливом УЗ кавітації на відповідні турбінні оливи, застосовано пристрій для приготування ізоляційної оливи, що насичена відповідним розчиненим газом за методикою [10]. УЗ опромінювання ЕО виконано у продовж 50 хвилин. Початковий вміст компонентів в ЕО не перевищував значення: 0,03 % маси – для води [2]; порогів визначення – для розчинених газів [10]. Наявність твердих часток вуглецю в ЕО визначено за методикою [12]. Початковий вміст присадок в ЕО мав значення: а) «Іонол» – 0,5 % маси, «В-15/4» – 0,02 % маси, «Д-157» – 0,02 % маси, «Дф-11» – 0,52 % маси (для «Тп-30»); б) «Іонол» – 0,8 % маси, «В-15/4» – 0,02 % маси, «Д-157» – 0,02 % маси (для «Азмол Тп-22с» та «Агрінол Тп-22»); в) «Іонол» – 0,3 % маси (для «ХФ-12-16»). Вимірювання вмісту газів в ЕО виконано при температурі t_i = (20 ± 0,5) ^{0}C. Тривалість газової екстракції компонентів з ЕО – не менше, ніж 1 година.

На рис. 1 показано удосконалену принципову схему установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО [5].

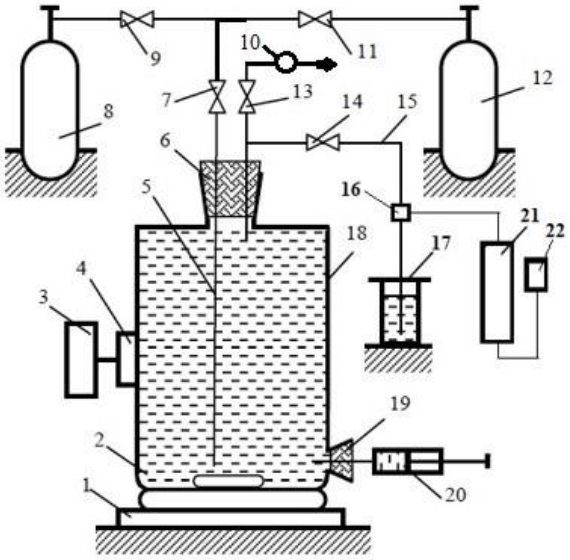

Рис. 1. Удосконалена принципова схема установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО: 1 – магніт; 2 – магнітна мішалка; 3 – УЗ генератор; 4 – УЗ випромінювач; 5, 15 – газові трубопроводи; 6 – кришка; 7, 9, 11, 13, 14 – крани; 8 – газовий балон з воднем; 12 – газовий балон з повітрям; 10 – вакуумний насос; 16 – перемикач газових потоків; 17 – рідинний затвор; 18 – посудина з ЕО; 19 – вузол введення та відбору ЕО; 20 – шприц; 21 – індикаторна трубка (або газовий кран-дозатор газового хроматографа); 22 –ротаметр

Джерело: розроблено автором.

Установка (рис. 1) працює таким чином: 1) за допомогою вакуумметра поз. 10 вакуумують посудину поз.18 до залишкового тиску не більше 0,1 мм рт. ст.; 2) заповнюють посудину поз.18 дегазованою ЕО на 90 % від об'єму посудини поз.18; 3) за допомогою шприца поз. 20 відбирають пробу ЕО для визначення в ній вмісту: розчинених газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, N_2, O_2, PH_3, H_2S, SO_2; води; присадок; твердих частинок вуглецю; 4) пропускають через ЕО потік водню з використанням газового балона поз. 8 або потік повітря з використанням балона поз. 12; 5) за допомогою відповідних індикаторних трубок поз. 21 визначають у газовому потоці водню (або повітря) вміст у ньому газів PH_3, H_2S, SO_2; 6) за допомогою газового хроматографа (з використанням перемикача газових потоків поз. 16 визначають у газовому потоці водню (або повітря) вміст у ньому газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, N_2, O_2; 7) за допомогою УЗ генератора та УЗ випромінювача піддають УЗ опромінюванню ЕО в посудині поз.18 протягом 50 хвилин; 8) після закінчення УЗ опромінювання: а) відбирають пробу ЕО для визначення в ній вмісту C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, N_2, O_2; води; присадок; твердих часток вуглецю; б) пропускають через опромінену ЕО потік водню з використанням газового балона поз. 8 або потік повітря з використанням балона поз. 12, і визначають у потоці відповідного газу (водню або повітря) присутність у ньому газів PH_3, H_2S, SO_2 (за допомогою відповідних індикаторних трубок поз. 21), або газів C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, N_2, O_2 (за допомогою газового хроматографа).

У табл. 1 наведено результати дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО.

З табл. 1 випливає, що при дослідженні впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО, у цих оливах: генеруються та розчиняються гази C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2; вміст присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157».

Таблиця 1 – Результати дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО

ЕО	Вміст розчинених газів, ppm							Вміст присадки, % маси		
	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	«Іонол»	«В-15/4»	«Д-157»
Компресорна олива «ХФ-12-16» для холодильних машин										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,3	відс	відс
2	0,15	1,3	0,1	0,6	1,0	0,1	0,03	0.1	відс	відс
Турбінна олива «Азмол Тп-22с»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,8	0,02	0,02
2	0,1	1,2	0,08	0,6	1,0	0,08	0,03	0,4	< 0,01	< 0,01
Турбінна олива «Агрінол Тп-22»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,8	0,02	0,02
2	0,09	1,1	0,09	0,5	1,1	0,1	0,05	0,3	< 0,01	< 0,01
Турбінна олива «Тп-30»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,5	0,02	0,02
2	0,3	1,7	0,2	0,8	0,9	0,2	0,05	0,2	< 0,01	< 0,01
Турбінна олива «Reolube®OMTI»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	відс	відс	відс
2	0,2	1,3	0,1	0,7	1,1	0,11	0,08	відс	відс	відс
Примітки: ЕО – енергетична олива; 1 та 2 – енергетична олива до та після US опромінювання, відповідно; пв – поріг визначення, ppm; відс – відсутність даних.										

Джерело: розроблено автором.

На рис. 2 показано наявність твердих часток вуглецю на фільтрі після фільтрації турбінної оливи «Тп-30» після закінчення впливу на неї УЗ кавітації.

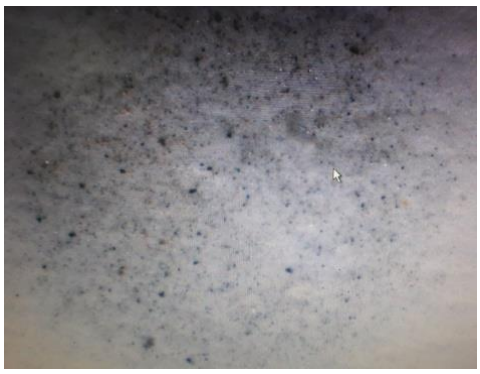

Рис. 2. Наявність твердих часток вуглецю на фільтрі після фільтрації турбінної оливи «Тп-30» після закінчення впливу на неї УЗ кавітації

Джерело: розроблено автором.

Аналогічні результати (по наявності твердих часток вуглецю) отримано після визначення впливу УЗ кавітації на інші досліджені ЕО.

При дослідженні вмісту повітря (або водню) за методом ГХ [10; 11] у турбінних оливах під впливом на них УЗ кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив, показано, що при температурі 20 ^{0}C ці турбінні оливи містять у собі повітря (або водень) у вигляді емульсії із загальнім вмістом відповідного газу (повітря або водню) не більше, ніж 15 % об'ємних. При цьому, наприклад для турбінної оливи «Тп-30» при температурі 20 ^{0}C досліджено, що розчинність повітря не перевищує 11 % об'ємних, а розчинність водню не перевищує 5,2 % об'ємних [25].

При дослідженні наявності H_2S, SO_2, PH_3 в газових потоках над турбінними оливами під впливом на них УЗ кавітації, встановлено, що: а) концентрація SO_2 у повітрі над поверхнею турбінної оливи «Азмол Тп-22с» має значення 1,3 ppm. Вплив УЗ кавітації на мінеральні турбінні оливи «Агрінол Тп-22» та «Тп-30» має аналогічний характер: у повітрі накопичується SO_2, що утворюється із цих турбінних олив, та переходить у газову фазу (у повітря) над ними; б) концентрація H_2S у водні над поверхнею турбінної оливи «Азмол Тп-22с» має значення 2.3 ppm. Вплив УЗ кавітації на мінеральні турбінні оливи «Агрінол Тп-

22» та «Тп-30» має аналогічний характер: у водні накопичується H_2S, що утворюється із цих турбінних олив, та переходить у газову фазу (водень) над ними; в) концентрація PH_3 у водні над поверхнею турбінної оливи «Reolube®OMTI» має значення 1,5 ppm: PH_3 утворюється з цієї турбінної оливи та переходить у газову фазу (водень) над нею.

У табл. 2 наведено результати дослідження значень кінематичної в'язкості *v* для ЕО в інтервалі температур 10–100 ^{0}C під впливом на них УЗ кавітації.

Таблиця 2 – Результати дослідження значень кінематичної в'язкості для ЕО в інтервалі температур 10–100 ^{0}C під впливом на них УЗ кавітації

ЕО	10 ^{0}C	15 ^{0}C	20 ^{0}C	30 ^{0}C	40 ^{0}C	50 ^{0}C	60 ^{0}C	70 ^{0}C	80 ^{0}C	100 ^{0}C
	Кінематична в'язкість, мм^2/с									
Компресорна олива «ХФ-12-16 для холодильних машин										
1	155	105	78	43	27	18	13	10	7	5
2	93	63	47	26	16	11	7,8	6	4,2	3
Турбінна олива «Азмол Тп-22с»										
1	150	130	100	56	33	21	15	10	8	5,8
2	75	65	50	28	16	11	8	6	4	3
Турбінна олива «Агрінол Тп-22»										
1	210	150	100	54	32	22	14	10	7,9	6
2	105	75	50	27	16	11	7	5,5	4	3
	Турбінна олива «Тп-30»									
1	340	230	160	85	48	30	21	15	11	6
2	220	150	104	55	31	20	13,7	10	7,2	3,9
Турбінна олива «Reolube®OMTI»										
1	155	110	74	42	25	17	11	8	6	4,4
2	101	72	48	27	16	11	7	5	3,9	2,9
Примітки: ЕО – енергетична олива; 1 та 2 – енергетична олива до та після УЗ опромінювання, відповідно										

Джерело: розроблено автором.

На рис. 3 як приклад у графічній формі показано характер залежності кінематичної в'язкості *v* від температури *t* для турбінної оливи «Reolube®OMTI».

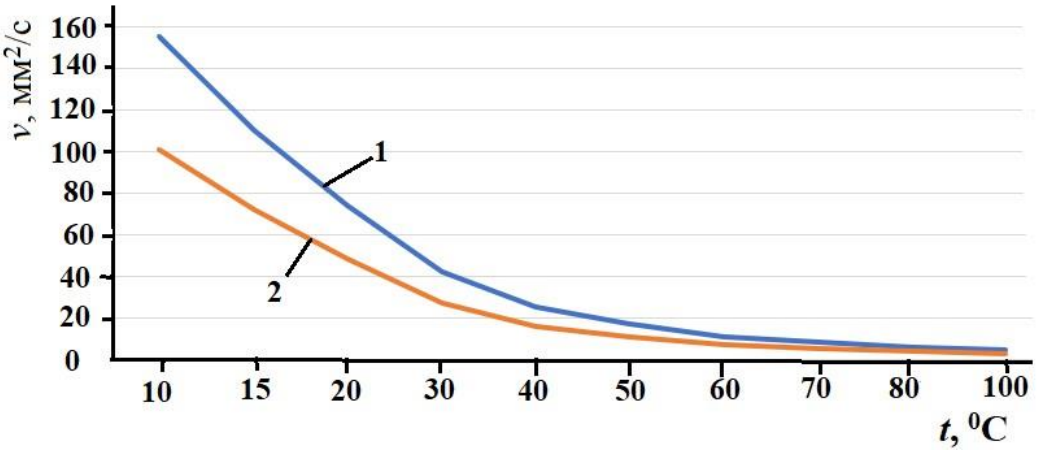

Рис. 3. Залежність значень кінематичної в'язкості v від температури t для турбінної оливи «Reolube®OMTI»: v – кінематична в'язкість; t – температура, ^{0}C; 1 – турбінна олива до УЗ опромінювання; 2 – турбінна олива після УЗ опромінювання

Джерело: розроблено автором.

З табл. 2 та рис. 3 випливає, що для досліджених ЕО в інтервалі температур 10 – 100 ^{0}C: підвищення температури призводить до зниження значень кінематичної в'язкості; УЗ опромінювання призводить до зниження значень кінематичної в'язкості. Аналогічний характер залежності $v = f(t)$ виявлено і для інших досліджених ЕО.

Результати дослідження показали, що якісний склад генерованих газів (C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2, H_2S, SO_2, PH_3) у відповідних ЕО під впливом на них акустичної кавітації відповідає якісному складу генерованих газів в аналогічних ЕО під впливом на них імпульсного електричного струму високої напруги [4].

Отримані результати дають змогу для подальшого визначення, наприклад, характеру деградації деемульгуючих, деактивуючих, протизношувальних, протипінних, комбінованих присадок та інгібіторів окиснення і корозії в турбінних оливах під впливом на них акустичної кавітації у вузлах підшипників турбогенераторів потужністю до 1200 МВт із водневим охолодженням, що оснащені системами циркуляції турбінних олив, для діагностування стану цих турбінних олив та розробки заходів для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість турбінних олив у процесі їх експлуатації та на надійність турбогенераторів.

Висновки. 1. Удосконалено принципову схему установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО дозволяє виконувати дослідження при потужності УЗ випромінювача 20 Вт з частотами до 125 кГц. 2. При дослідженні вмісту повітря (або водню) в турбінних оливах під впливом на них УЗ кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив, показано, що при температурі 20 ^{0}C ці турбінні оливи містять в собі повітря (або водень) у вигляді емульсії із загальнім вмістом відповідного газу (повітря або водню) не більше, ніж 15 % об'ємних. 3. Під впливом УЗ кавітації в ЕО: генеруються та розчиняються в них гази C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2; генеруються тверді частки вуглецю; вміст присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» знижується. 4. Встановлено наявність H_2S або SO_2 в газових потоках над мінеральними турбінними оливами, та наявність PH_3 в газових потоках над вогнестійкою синтетичною турбінною оливою (на основі трикселенілфосфатів) під впливом на ці турбінні оливи УЗ кавітації. 5. Для досліджених ЕО в інтервалі температур 10–100 ^{0}C: підвищення температури призводить до зниження значень кінематичної в'язкості; УЗ опромінювання призводить до зниження значень кінематичної в'язкості. 6. Отримані результати можуть бути застосовані для подальшого розвитку методів дослідження впливу акустичної кавітації на деградацію ЕО, у тому числі для визначення акустичної газостійкості ізоляційних рідин.

Список використаних джерел

1. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2003. – 598 с.

2. СОУ НАЕК 085:2020. Турбинні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Правила експлуатації. – Київ : НАЕК «Енергоатом», 2020. – 53 с.

3. Зайцев, С. Удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію турбінних олив / С. Зайцев // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4(34). – С. 147-162. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-147-162

4. Посібник з вивчення Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Електротехнічне устаткування електричних станцій та мереж, оперативно-диспетчерське керування / О. Г. Баженов, В. О. Бойко, В. М. Браєрський, О. П. Васьковський. – Київ : ДП НТУКЦ «Аселенерго», 2004. – 800 с.

5. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслонаполненного электрооборудования электрических станций и сетей / С. В. Зайцев, В. А. Кишневский, Г. А. Оборский, И. В. Прокопович. – Одесса : Экология, 2019. – 304 с.

6. Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant / P. Kuznietsov, A. Tykhomyrov, O. Biedunkova, S. Zaitsev // Scientific Horizon. – 2022. – Vol. 25, № 12. – P. 69-79. DOI :10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.

7. Жаров, А. П. Предупреждение аварий подшипников паровых турбин / А. П. Жаров. – Москва : Энергия, 1974. – 112 с.

8. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 99 с.

9. Анпилогов, Н. Г. Методы контроля состояния и диагностирования силовых трансформаторов классом напряжения 35 кВ и выше / Н. Г. Анпилогов, Я. С. Бедерак. – Харьков : Форт, 2010. – 408 с.

10. СОУ-Н ЕЕ 46.302:2006. Підготовка та проведення хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі маслонаповненого електрообладнання : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 70 с.

11. IEC 60567:1992-07. Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases. – Geneva : Switzerland, 2005. – 80 p.

12. СОУ ВЕА. 100.1/01:2015. Енергетичні оливи та оливні господарства підприємств енергетичної галузі України, та підприємств, де застосовується аналогічне обладнання. Організація експлуатації та технічного обслуговування. Норми та вимоги. – Київ : Стандарт «ВЕА», 2015. – 216 с.

13. ДСТУ ГОСТ 6794:2019. Олива АМГ-10. Технічні умови. – [Чинний з 10.06.2019]. – Київ : ДДП «УкрНДНЦ», Державний стандарт України, 2019. – 8 с.

14. Зайцев, С. В. Діагностування енергетичної оливи в системах охолодження насосних агрегатів обладнання електростанцій / С. В. Зайцев, В. М. Тихенко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – № 2(1/319). – С. 113-119. DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119

15. Balitskii, O. A. Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants / O. A. Balitskii, V. O. Kolesnikov, A. I. Balitskii, J. J. Eliasz, M. R. Havrylyuk // Archives of Materials Science and Engineering. – 2020. – № 104(2). – P. 49-57. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4894.

16. IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. – Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society / The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue. – New York, NY 10016-5997, 2019. – 98 p.

17.Экспериментальное и расчетное исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на теплофизические свойства растворов хладагента R600a с компрессорным маслом / В. П. Железный, Н. Н. Лукьянов, О. Я. Хлиева, А. С. Никулина // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – Т. 51, Вип. 4. – С. 82-91. DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.44780

18. ДСТУ ГОСТ 4960:2019 Порошок мідний електролітичний. Технічні умови. – [Чинний з 02.08.2019]. – Київ : ДДП «УкрНДНЦ», Державний стандарт України, 2019. – 18 с.

19. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Київ : КВІЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 170 с.

20. Трубки індикаторні SPH-1L (для фосфіну) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://greencoltd.com.ua/index.php/tovary/trubki-indikatornye-sph-1l.

21. Справочник по индикаторным трубкам и CMS чипам компании Dräger. Анализ почвы, воды и воздуха, а также технических газов [Електронний ресурс]. – Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2015. – 458 p. – Режим доступу: https://www.kpo-elektro.ru›files›Air-flow_tester.

22. IEC 60666:2010. Detection and determinanion of specified additives in mineral insulating oils. Geneva, Switzerland : International Standard. – 64 p.

23. ISO 3104:2020. Petroleum products – Transparent and opaque liquids – Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity. –Standard by International Organization for Standardization, 2020. – 32 p.

24. IEC 60814:1997. Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard –Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration Paperback – Distributed through American National Standards Institute (ANSI) (August 19, 2007). – Geneva : Switzerland, 2005. – 54 p.

25. Zaitsev, S. Improving methods for monitoring bearing units of electric motors in reverse water supply systems of nuclear power plants / S. Zaitsev, V. Tikhenko // Proceedings of Odessa Polytechnic University. – 2023. – Is. 1(67). – P. 96-105. DOI: 10.1527/opu.1.67.2023.12.

References

1. HKD 34.20.507-2003. Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla "GRIFRE" [Technical operation of power plants and networks. Rules. (GCD 34.20.507-2003)]. (2003). GKD 34.20.507-2003.

2. NAEK "Energoatom". (2020). SOU NAEK 085:2020. Turbynni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannia AES. Pravyla ekspluatatsii [Turbine oils for NPP power equipment. Operating rules. (SOU NAEK 085:2020)].

3. Zaitsev, S. (2023). Udoskonalennia metodiv vyznachennia vplyvu elektrychnykh rozriadiv na dehradatsiiu turbinnykh olyv [Improvement of methods for determining the effect of electrical discharges on the degradation of turbine oils]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies, 4*(34), 147–162. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-147-162.

4. Bazhenov, O.G., Boyko, V.O., Briersky, V.M., Vaskovskyi, O.P. (2004). *Posibnyk z vyvchennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii elektrychnykh stantsii i merezh. Elek-trotekhnichne ustatkuvannia elektrychnykh stantsii ta merezh, operatyvno-dyspetcherske keruvannia [Study guide for the Rules of Tech-nical Operation of Power Plants and Networks. Electrical equipment of power plants and networks, operational and dispatch control]*. SE NTUCC "Aselenergo".

5. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Oborsky, G.A., & Prokopovich, I.V. (2019). *Sovremennye metody kontrolia energeticheskikh masel i produktov ykh dehradatsii dlia obespecheniia nadezhnostii ekspluatatsii maslonapolnennogo elektrooborudovanyia ɔlektrycheskykh stantsyi y setei [Modern methods for monitoring energy oils and their degradation products to ensure the reliability of operation of oil-filled electrical equipment of power plants and networks]*. Ecology.

6. Kuznietsov, P., Tykhomyrov, A., Biedunkova, O, Zaitsev, S. (2022). Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant. *Scientific Horizon, 25*(12), 69–79. DOI:10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.

7. Zharov, A.P. (1974). *Preduprezhdenie avarii podshipnikov parovykh turbin [Prevention of accidents of steam turbine bearings]*. Energia.

8. "GRIFRE". (2007). Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannia za rezultatamy khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli [Diagnosis of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in insulating oil. Methodical instructions]. (SOU-N EE 46.501:2006).

9. Anpilogov, N.G., Bederak, Y.S. (2010). *Metody kontrolia sostoianiia i diagnostirovaniia sylovykh transformatorov klassom napriazheniia 35 kV i vyshe [Methods of condition control and diagnostics of power transformers of voltage class 35 kV and higher]*. Fort.

10. "GRIFRE". (2007). Pidhotovka ta provedennia khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli maslonapovnenoho elektroobladnannia : metod. Vkazivky [Preparation and chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodical instructions]. (SOU-N EE 46.302:2006).

11. International Standard. (1992). Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases (IEC publication 60567:1992-07).

12. Standart "VEA". (2015). Enerhetychni olyvy ta olyvni hospodarstva pidpryiemstv ener-hetychnoi haluzi Ukrainy, ta pidpryiemstv, de zastosovuietsia analohichne obladnannia. Orhanizatsiia ekspluatatsii ta tekhnichnoho obsluhovuvannia. Normy ta vymohy [Energy oils and olive farms of enterprises of the energy sector of Ukraine, and enterprises where similar equipment is used. Organization of oper-ation and maintenance. Norms and requirements]. (SOU VEA. 100.1/01:2015).

13. DP «UkrNDNTS», Derzhavnyy standart Ukrayiny. (2019). *Olyva AMH-10. Tekhnichni umovy [AMG-10 oil. Technical specifications] (DSTU GOST 6794:2019).*

14. Zaitsev, S.V., & Tychenko V.M. (2023). Diahnostuvannia enerhetychnoi olyvy v systemakh okholodzhennia nasosnykh ah-rehativ obladnannia elektrostantsii [Diagnostics of energy oil in cooling systems of pumping units of power plant equipment]. *Visnyk Khmelnytskoho natsi-onalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 2(1-319), 113–119. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119.

15. Balitskii, O.A., Kolesnikov, V.O., Balitskii, A.I., Eliasz, J.J., Havrylyuk, M.R. (2020). Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants. *Archives of Materials Science and Engineering*, 104-2, 49–57. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4894.

16. IEEE. (2019). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society: The Institute of Elec-trical and Electronics Engineers, USA (IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008).

17. Zhelezny, V.P., Lukianov, N.N., Khliyeva, O.Ya., Nikulina, A.S. (2015). Eksperimentalnoe i raschetnoe issledovanie vliianiia nanochastits Al2O3 na teplofizicheskie svoistva rastvorov khladahenta R600a s kompressornым maslom [Experimental and calculational studies of the nanoparticle Al_2O_3 additives on thermalphisical properties of refrigerant R600a-compressor oil solution]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia – Refrigeration equipment and technology,* 51(4), 82–91. DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.44780

18. DP «UkrNDNTS», Derzhavnyy standart Ukrayiny. (2019). *Poroshok midnyi elektrolitychnyi. Tekhnichni umovy [Electrolytic copper powder. Technical specifications] (DSTU GOST 6794:2019).*

19. KVITS. (2009). *Pryimannia, zastosuvannia ta ekspluatatsiia transformatornykh masel. Normy otsiniuvannia yakosti [Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment]*. (SOU-N EE 43.101:2009).

20. Trubky indykatorni SPH-1L (dlia fosfinu) [Indicator tubes SPH-1L (for phosphine)]. (n.d.). https://greencoltd.com.ua/index.php/tovary/trubki-indikatornye-sph-1l.

21. Dräger Safety AG & Co. (2015). *Spravochnyk po yndykatornым trubkam y CMS chypam kompanyy Dräger. Analyz pochvы, vodы y vozdukha, a takzhe tekhnycheskykh hazov [A guide to Dräger indi-cator tubes and CMS chips. Analysis of soil, water and air as well as technical gases]*. (17th edition). KGaA. Lübeck. https://www.kpo-elektro.ru›files›Air-flow_tester.

22. International Standard. (2010). *Detection and determinanion of specified additives in mineral insulating oils*. (IEC 60666:2010).

23. Standard by International Organization for Standardization. (2020). Petroleum products – Transparent and opaque liquids – Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity (ISO publication 3104:2020).

24. International Standard. (1997). Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard – Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration Paperback – Distributed through American National Standards Institute (ANSI) (August 19, 2007) (IEC publication 60814:1997)

25. Zaitsev, S., V. Tikhenko, V. (2023). Improving methods for monitoring bearing units of electric motors in reverse water supply systems of nuclear power plants. *Proceedings of Odessa Polytechnic University,* 1-67, 96–105. DOI: 10.1527/opu.1.67.2023.12.

Отримано 18.03.2024

UDC: 621.89.098:537.52

Serhii Zaitsev

PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of nuclear power plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)
E-mail: sdjavdet@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1166-3243

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING THE DEGRADATION OF ENERGY OILS UNDER THE INFLUENCE OF ACOUSTIC CAVITATION

The article is a publication of scientific and methodical character. The analysis of researches and publications has shown that it is urgent to continuously improve methods of determining the influence of acoustic cavitation on degradation of power oils in order to diagnose further the condition of these oils; develop measures to prevent such degradation or reduce its influence on the quality of power oils during their operation in oil-filled heat-mechanical equipment of a nuclear power plant.

The paper deals with the results of improving the method for determining the degradation of energy oils under the influence of acoustic cavitation. The aim of the study is to improve the reliability of the results of determining the effect of acoustic cavitation on the degradation of energy oils. Subjects of research: turbine oils "Azmol TP-22c", "Agrinol TP-22", "TP- 30", "Reolube®OMTI" (based on trixylene phosphates), compressor oil "HF-12-16".

The paper improves the schematic diagram of an installation for studying the effect of acoustic cavitation on the degradation of energy oils, which allows performing studies at an ultrasonic emitter power of 20 W with frequencies up to 125 kHz.

During the study of the air (or hydrogen) content in turbine oils under the influence of ultrasonic cavitation in the presence of air (or hydrogen) above the surfaces of these turbine oils, it was shown that at a temperature of 20 ^{0}C, these turbine oils contain air (or hydrogen) in the form of an emulsion with a total content of the corresponding gas (air or hydrogen) of no more than 15 % by volume.

In the course of studying the effect of ultrasonic cavitation on the degradation of energy oils, it was found that under the influence of ultrasonic cavitation in energy oils: gases C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4, H_2, CO, CO_2 are generated and dissolved in them; solid carbon particles are generated; the content of additives "Ionol", "B-15/41", "D-157" decreases. The presence of H_2S or SO_2 in gas flows over mineral turbine oils and the presence of PH_3 in gas flows over fire-resistant synthetic turbine oil under the influence of ultrasonic cavitation on these turbine oils was established. For the studied energy oils in the temperature range of 10-100 ^0C: an increase in temperature or ultrasonic irradiation leads to a decrease in the kinematic viscosity.

The results of research can be used for reasonable choice or design: measuring equipment for subsequent determination of the nature of degradation of demulsifying, deactivating, anti-wear and anti-foam additives, combined additives and inhibitors of oxidation and corrosion in power oils under the influence of acoustic cavitation in the bearing units of hydrogen-cooled turbine generators equipped with turbine oil circulation systems; elements of systems for diagnostics of the state of these power generators; elements of systems for diagnostics of the state of these power oils.

Keywords: *energy oils; mineral turbine oils; flame retardant synthetic turbine oils; gas chromatography; dissolved gases; acoustic cavitation; additive "Ionol"; kinematic viscosity.*

Fig.: 3. Table: 2. References: 25.

Зайцев С. Удосконалення методу визначення деградації енергетичних олив під впливом акустичної кавітації. *Технічні науки та технології.* 2024. № 1(35). С. 178-189.