

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



*Одеська державна академія
технічного регулювання та якості*

ISSN 2412 – 5288 (Print)

ISSN 2414 – 9780 (Online)

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

1(18) 2021

ОДЕСА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ
Випуск 1(18) 2021

Заснований у 2012 р.

Засновник: Одеська державна академія технічного регулювання та якості

65020, м. Одеса, вул. Ковальська (Кузнечна), 15

Телефон: (048)726-68-92, факс: (048)726-76-95

E-mail: odatry@gmail.com

Сайти: <https://osatrq.edu.ua>, odatrya.org.ua.

Редакційна колегія

Голова редакційної колегії

Коломієць Леонід Володимирович (д.т.н., професор)

Заступник голови редакційної колегії

Братченко Геннадій Дмитрович (д.т.н., професор)

Аніскін Олексій (к.т.н., доцент, Республіка Хорватія)

Банзак Оксана Вікторівна (д.т.н., професор)

Боряк Костянтин Федорович (д.т.н., професор)

Ваганов Олександр Іванович (д.т.н., професор)

Величко Олег Миколайович (д.т.н., професор)

Волков Сергій Леонідович (д.т.н., доцент)

Гасанов Юсиф Надир огли (д.т.н., професор, Азербайджанська Республіка)

Гордієнко Тетяна Богданівна (д.т.н., професор)

Грабовський Олег Вікторович (к.т.н., доцент)

Діденко Віктор Дмитрович (д.ф.-м.н., професор)

Зборовська Ірина Адамівна (к.т.н., доцент)

Квасніков Володимир Павлович (д.т.н., професор)

Корсун Валерій Іванович (д.т.н., професор)

Кучерук Володимир Юрійович (д.т.н., професор)

Лещенко Олег Іванович (к.т.н., доцент)

Мілковіч Марін (к.т.н., професор, Республіка Хорватія)

Мілованов Валерій Іванович (д.т.н., професор)

Меленчук Тетяна Михайлівна (д.т.н., професор)

Новіков Володимир Миколайович (д.ф.-м.н., професор)

Салсеану Александру (д.т.н., професор, Румунія)

Семенова Алла Василівна (д.пед.н., професор)

Скачков Валерій Вікторович (д.т.н., професор)

Солдо Божо (д.т.н., професор, Республіка Хорватія)

Чундева-Блаєр Марія (д.т.н., професор, Республіка Північна Македонія)

Янковський Олег Георгійович (к.т.н., доцент)

Відповідальний секретар Братченко Геннадій Дмитрович

Внесений наказами Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886 та від 24.09.2020 № 1188 до Переліку наукових фахових видань України (Категорія «Б»), галузь – технічні науки, спеціальності – 275, 151, 152.

Затверджений до друку і розповсюдження через мережу Інтернет Вченою Радою факультету електроніки, автоматики та метрології (протокол № 2 від 23.09.2021 р.).

Свідectво про державну реєстрацію КВ № 18770-7570Р від 30.01.2012 р.

© Одеська державна академія технічного регулювання та якості

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ZBİRNİK NAUKOVİH PRAC' ODES'KOİ DERŽAVNOİ AKADEMİİ
TEHNIČNOGO REGULŪVANNÂ TA ÂKOSTİ (COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS OF THE ODESA STATE ACADEMY OF TECHNICAL REGULATION
AND QUALITY)
Issue 1(18) 2021

Established in 2012

Founder is Odesa state academy of technical regulation and quality

15 Kovalska street, Odesa, 65020, Ukraine

Phone: (048) 726-68-92, fax: (048) 726-76-95

E-mail: odatry@gmail.com

Websites: <https://osatrq.edu.ua>, odatrya.org.ua.

Editorial board

Editor-in-Chief

Kolomiets Leonid (DSc, Professor, Ukraine)

Deputy Editor

Bratchenko Hennadii (DSc, Professor, Ukraine)

Aniskin Aleksej (PhD, Associate Professor, Republic of Croatia)

Banzak Oksana (DSc, Professor, Ukraine)

Boriak Kostiantyn (DSc, Professor, Ukraine)

Vahanov Oleksandr (DSc, Professor, Ukraine)

Velychko Oleh (DSc, Professor, Ukraine)

Volkov Serhii (DSc, Associate Professor, Ukraine)

Hasanov Yusif Nadir Ogly (DSc, Professor, Azerbaijan Republic)

Gordiyenko Tetyana (DSc, Professor, Ukraine)

Hrabovskyi Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Didenko Viktor (DSc, Professor, Ukraine)

Zborovska Iryna (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Kvasnikov Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Korsun Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Kucheruk Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Leshchenko Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Milković Marin (PhD, Professor, Republic of Croatia)

Milovanov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Melenchuk Tetiana (DSc, Professor, Ukraine)

Novikov Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Salceanu Alexandru (DSc, Professor, Romania)

Semenova Alla (DSc, Professor, Ukraine)

Skachkov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Soldo Božo (DSc, Professor, Republic of Croatia)

Cundeva-Blajer Marija (DSc, Professor, Republic of North Macedonia)

Yankovskyi Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Secretary Bratchenko Hennadii

Included by orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 02.07.2020 No. 886 and from 24.09.2020 No. 1188 to the List of scientific professional publications of Ukraine (Category "B"), branch – technical sciences, specialties – 275, 151, 152.

Approved for printing and distribution through the Internet by the Academic Council of the Faculty of Electronics, Automation and Metrology (protocol No. 2 dated September 23, 2021).

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 18770-7570Р від 30.01.2012 р.

© Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality

ЗМІСТ

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості	5
М. І. Сичов, к.х.н. ОСОБЛИВОСТІ ОСАДОУТВОРЕННЯ ГІДРОКСИДУ МАГНІЮ ПРИ НАПРАВЛЕНОМУ ГІДРОЛІЗІ В РОЗЧИНАХ ХЛОРИДУ МАГНІЮ.....	6
Л. В. Коломієць, д.т.н., А. М. Курмаш, Л. В. Кузнецова ПИТАННЯ ВЕРИФІКАЦІЇ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ДІТЯЧИХ ІГРАШОК.....	14
Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення	22
В. І. Мілованов, д.т.н., Д. О. Балашов ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ЯКІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ МАЛОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ.....	23
В. В. Горін, д.т.н., Л. В. Коломієць, д.т.н., В. В. Серeda, к.т.н. МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС ПЛІВКОВОЇ КОНДЕНСАЦІЇ У СЕРЕДИНІ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБ.....	31
Інформаційно-вимірювальні системи і технології	41
В. П. Квасніков, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. О. Катаєва, к.т.н. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	42
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	53
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	54
НЕКРОЛОГ СВІТЛИЙ ПАМ'ЯТІ Володимира Миколайовича Новікова.....	55

РОЗДІЛ 1

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості

УДК 546-482:661.846

М. І. Сичов, к.х.н.*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса***ОСОБЛИВОСТІ ОСАДОУТВОРЕННЯ ГІДРОКСИДУ МАГНІЮ ПРИ НАПРАВЛЕНОМУ ГІДРОЛІЗІ В РОЗЧИНАХ ХЛОРИДУ МАГНІЮ**

Сполуки магнію поширені в природі. Високочисті сполуки магнію важливі для виробництва сталі, термостійкої кераміки, вогнетривких пластмас, в хімічній, фармацевтичній галузях, при виробництві оптики, люмінофорів, монокристалів, в медицині. Особливо чисті гідроксид та оксид магнію застосовують при створенні матриць-колекторів для інструментальних аналізів. Ці потреби викликали дослідження гідроксиду магнію як сорбенту. Досліджені процеси лужного гідролізу хлориду магнію і утворення осаду гідроксиду магнію, кінетика процесів, властивості осаду в умовах виникаючих реагентів. Встановлені математичні закономірності умов отримання осаду гідроксиду магнію з високим коефіцієнтом фільтрації. Результати досліджень дають можливість створення технологій високочистих сполук магнію, нових еталонів і стандартів для метрологічного забезпечення точності і достовірності вимірювань.

Ключові слова: магній, гідроліз, гідроксид, хлорид, сорбент, очистка, фільтрація.

М. И. Сычев, к.х.н.**ОСОБЕННОСТИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ ГИДРОКСИДА МАГНИЯ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ГИДРОЛИЗЕ В РАСТВОРАХ ХЛОРИДА МАГНИЯ**

Соединения магния распространены в природе. Высокочистые соединения магния применяются в производстве стали, термостойкой керамики, огнеупорных пластмасс, в химической, фармацевтической отраслях, при производстве оптики, люминофоров монокристаллов, в медицине. Особо чистые гидроксид и оксид магния применяют при создании матриц-коллекторов для инструментальных анализов. Эти потребности вызвали исследование гидроксида магния в качестве сорбента. Исследованы процессы щелочного гидролиза хлорида магния и образования осадка гидроксида магния, кинетика процессов, свойства осадка в условиях возникающих реагентов. Установлены математические закономерности условий получения осадка с высоким коэффициентом фильтрации. Результаты исследований дают возможность получения высокочистых соединений, создания новых эталонов и стандартов для метрологического обеспечения точности и достоверности измерений.

Ключевые слова: магний гидролиз, гидроксид, хлорид, сорбент, очистка, фильтрация.

М. I. Sychov, PhD**FEATURES OF MAGNESIUM HYDROXIDE PRECIPITATION DURING DIRECTIONAL HYDROLYSIS IN SOLUTIONS OF MAGNESIUM CHLORIDE**

Magnesium compounds are common in nature as solid rocks and solutions in waters. The article has been analyzed variety of technologies and methods of use of various kinds of raw magnesium compounds, scientific and technological achievements, the state of magnesium production and technology. Magnesium and its oxide and hydroxide are the most important for industrial use of magnesium compounds used in the production of steel, heat-resistant ceramics and structures, in the production of rubber products, plastics with special fire-resistant properties, as well as in the chemical, pharmaceutical industries, in medicine, in the production of optics, phosphors, single crystals, heed for magnesium compounds, important for new industries, caused the emergence of new studies and technologies. Important in the purification technologies of raw materials and technical solutions of magnesium chloride is the possibility of using magnesium hydroxide as effective sorbent and developing conditions for separating the sediment in a wide range of concentrations. The processes of alkaline hydrolysis of magnesium chloride and the formation of the precipitate of its hydroxide in a wide range of concentrations were studied. The kinetics of the process and the features of separating such a sorbent from the purified solution of magnesium salt are studied. It is shown that the use of the

principle of homogeneous precipitation of magnesium hydroxide, performed in the proposed technology, is a fairly efficient and simple solution compared to those known. The conditions and mathematical regularities for obtaining the precipitate of magnesium hydroxide with a high filtration coefficient have been determined, which makes it possible to program the properties of the precipitate of magnesium hydroxide, to optimize the production of high-purity solutions of magnesium chloride, its hydroxide and oxide from it. The results of studies may use in medicine, in the production of new pharmaceuticals, standard samples, matrix collectors-sorbents and standards for metrological support in research.

Keywords: *magnesium hydrolysis, hydroxide, chloride, sorbent, purification, filtration.*

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-6-14

Вступ. Магній і його сполуки є одними із найбільш розповсюджених на Землі. Ці сполуки є у вигляді сухопутних мінералів: карбонатів, магнезитів та серпентинітів. Трапляються і прояви мінералу бруситу. Та найбільше сполук магнію існують у вигляді розчинів його солей у водах морів і океанів, солоних озер та лиманів або ж у вигляді бішофіту – насиченого розчину хлориду магнію [1]. Оскільки використання у вигляді сировини мінералів суходолу є достатньо складним у технологічних процесах їх переробки на цільові сполуки – гідроксид магнію та його оксид, то увагу вчених і технологів привернула можливість використання природних розчинів в якості сировини для отримання з них сполук магнію, в яких настала потреба розвитку техніки [2-4]. Такою сполукою став гідроксид магнію осаджений лужними реагентами з природних розчинів [5].

Аналіз основних досягнень і публікацій

З огляду на важливість технології отримання гідроксиду магнію був проведений аналіз стану наукових та науково-практичних досліджень щодо хімічних аспектів отримання його з розчинів його солей (в основному з хлориду магнію). Така сполука найбільш поширена в природних розчинах (морські та океанічні води, розсоли, розчини бішофіту та інше). Велику кількість гідроксиду і оксиду магнію високого ступеню чистоти використовує фармацевтична промисловість [6]. В наш час технології отримання гідроксиду і оксиду магнію бурхливо розвиваються у багатьох країнах [4-8]. Існують і потреби новітньої техніки щодо отримання гідроксиду магнію і його оксиду у вигляді структур з частками нанорозміру [9]. З гідроксиду магнію високої чистоти при його термічному розкладанні одержують оксид магнію для потреб енергетики, новітньої кераміки, в тому числі і прозорі, електротехнічних, оптичних і люмінофорних матеріалів, монокристалів та еталонів, особливо термостійких пластмас. Гідроксид магнію високої чистоти може слугувати матеріалом для сорбції та утворення осаду з іншими метал-іонами, які визначаються при аналізах речовин і розчинів. Засто-

сування гідроксиду магнію високої чистоти дозволить підвищити достовірність отриманих результатів нейтронно-активаційним, рентгенофлуоресцентним та атомно-абсорбційним методами. Також можливо створювати високочисті сполуки хімічних елементів, завдяки властивості гідроксиду магнію до сорбції метал-іонів, застосовувати їх в медицині для створення МР-фантомів для верифікації вимірювань та перевірки роботи магнітно-резонансних томографів (МРТ) [7-10]. У виробництві гідроксиду магнію при лужному осадженні з його сольових природних розчинів існують дві основні проблеми. Перша з них полягає в тому, що гідроксид магнію має достатньо високу здатність до сорбції іонних форм більшості металів, які мають значення $pH_{\text{осаду}} \leq pH_{\text{осаду}} Mg(OH)_2$, що і надає можливість застосовувати його в якості сорбенту іонних форм більшості металів, особливо 3-d металів, щоб вилучати їх з розчину. Це дозволяє отримувати розчини достатньо вільні від сторонніх сполук, перш за все 3-d металів [11]. Друга особливість осаду пов'язана із його структурою, що значно обводнена та має здатність до деформації водних прошарків та тиску між ними, що уповільнює процес відокремлення твердої фази гідроксиду від розчину реакційного середовища фільтрацією. Невисока швидкість фільтрації та відокремлення осаду гідроксиду магнію від маточної рідини завжди була предметом окремих досліджень та запропонованих способів формування осаду гідроксиду магнію з високою швидкістю фільтрації [12]. Відомі способи утворення осаду гідроксиду магнію в умовах застосування малоактивних лужних реагентів; застосування ретур при осадженні; застосування поверхнево-активних речовин; нагріву реакційного об'єму; електроосадження [12]. Відомо також, що на здатність до сорбції сторонніх металів-іонів гідроксидом магнію впливають стан структури гідроксиду і стан форм сторонніх метал-іонів. При додаванні лужного реагенту до розчину, що містить іони магнію, осад гідроксиду магнію утворюється з високою швидкістю, тому іони сторонніх металів реагують в основному з поверх-

нею гідроксиду магнію, без участі сорбційно активних центрів структури осаду. Тож важливо забезпечити умови рівномірної взаємодії активних центрів в структурі осаду вже на стадії, коли існують високоактивні до хімічної і сорбційної взаємодії гідролізовані форми макро- і мікрокомпонентів, а не на стадії сформованої структури гідроксиду магнію. Раніше було встановлено, що лужне осадження до 5 % іонів магнію з розчину дозволяє повністю виділити на гідроксиді домішкові елементи [13].

Метою роботи є обґрунтування можливості одержання осаду гідроксиду магнію з високим коефіцієнтом фільтрації, що відокремлюється від очищеного розчину простими способами швидкого фільтрування придатними для запропонованої технології.

Виклад основного матеріалу.

Для вирішення вказаних проблем проводилось лужне осадження гідроксиду магнію з його хлориду різних ступенів концентрації 0,05-4,0 моль/дм³. При цьому був застосований розчин гідроксиду натрію постійної концентрації 0,2 г/дм³. При pH = 8,22-9,86 було встановлено існування двох основних типів продуктів лужного осадження. Перший, на початку осадження, з добутком розчинності $DP = (2,41-2,64) \cdot 10^{-10}$, що відповідає відомій лабільній (активній) формі гідроксиду магнію з $DP = 3,47 \cdot 10^{-10}$. Другий тип осаду (в кінці осадження) з $DP = (1,15-1,54) \cdot 10^{-11}$ найбільш відповідає значенню для окристалізованої форми гідроксиду з $DP = 1,48 \cdot 10^{-11}$ [14]. Значення добутків розчинності, розрахованих за результатами даних проведених осаджень, були порівняні з відомими з хімічних досліджень [15]. Такі результати мали місце для всіх концентрацій хлориду магнію в наших дослідках. Нами встановлено (інші дані в літературі відсутні), що активний гідроксид магнію має здатність реагувати з хлоридом магнію і переходити в розчин (без утворення твердої фази) (рис. 1).

Така здатність до розчинення лабільної форми гідроксиду магнію помітна вже при концентрації хлориду магнію в 1 г-іон/дм³ і підвищується з ростом початкової концентрації хлориду магнію (рис. 1). При цьому концентрації хлориду магнію в 1,0-4,75 г-іон/дм³ дозволяють після розчинення активного гідроксиду утворювати його лугом знову, доки процес розчинення не зупиниться. Таке утворення метастабільних розчинів свідчить про взаємодію концентрованих розчинів хлориду магнію та первісної лабільної форми гідроксиду магнію з утворенням комплексів магнію і переважний вплив концентрації хлориду магнію на цей процес на відміну від процесів утворення комплексних сполук інших мета-

лів, які утворюють розчинні комплекси в надлишках луку при осадженні. Нами було встановлено, що іони магнію в розчинах можуть існувати у вигляді гідроксокомплексів загальної формули $[Mg\{(OH)_2Mg\}_n]^{2+}$, де $n = 1,2,3,\dots$, що відповідає складу сполук магнію, які з часом випадають з таких метастабільних розчинів комплексів магнію. Порівняння складу осадів магнію, що випадають, показує генетичну відповідність складу гідроксокомплексів розчину. Проведені подальші дослідження показали, що в разі розбавлення концентрованих розчинів хлориду магнію, що містять комплекси утворені лугом, виникають осадки гідроксиду магнію. Ці осадки мають низку специфічних властивостей і склад в залежності від часу його утворення (рис. 2), а весь процес утворення осаду проходить у три етапи.

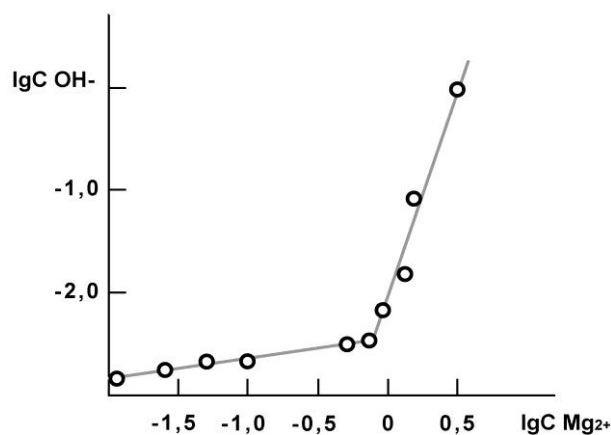


Рисунок 1 – Залежність лужності розчинів $MgCl_2$ від їх концентрації при осадженні гідроксиду магнію

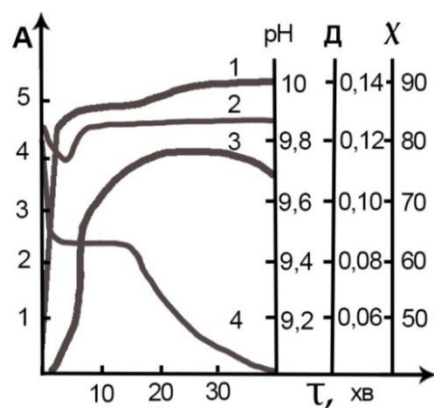


Рисунок 2 – Утворення осаду гідроксиду магнію при розбавленні лужних розчинів $MgCl_2$ від 4 до 0,5 моль/дм³, τ – час утворення осаду, хв; 1 – кількість Mg^{2+} в осаді (А), % від початкової кількості; 2 – електропровідність реакційного середовища (χ), Ом⁻¹·см⁻¹·10⁻³; 3 – оптична густина (Д); 4 – рН середовища

Дослідження осадів на трьох основних етапах утворення, їх складу та властивостей проводилось на основі експериментальних даних з рН-метрії та електропровідності, оптичних властивостей (нефелометрія) реакційного середовища та з допомогою ІЧ спектроскопії, в тому числі і дейтероаналогів (рис. 3), рентгено-структурного та рентгенофазового аналізу, термографії (рис. 4) та електронної мікроскопії (рис. 5).

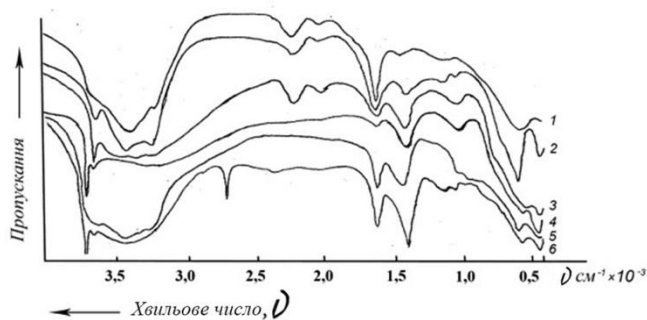


Рисунок 3 – ІЧ спектри фаз осаду гідроксиду магнію: 1, 2 – зародки; 3 – первісні частинки; 4 – кристали гідроксиду магнію; 5, 6 – дейтеровані зразки зародків і кристалів; ν – хвильове число

ІЧ спектри (рис. 3) дають можливість зробити висновки щодо складу та будови твердих фаз гідроксиду магнію при розбавленні лужних розчинів його хлориду. Для зародкової фази до коливань молекул води відносяться низка смуг поглинання при $3400-\nu(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})$, $1620-1650-\delta(\text{H}_2\text{O})$, $545-560 \text{ cm}^{-1} \rho(\text{H}_2\text{O})$. Смуги поглинання в області $1020-1220 \text{ cm}^{-1}$ свідчать про деформаційне коливання координованих гідроксогруп $\text{Mg}-\text{OH}^+$. Молекули води, координовані разом з OH -групами навколо атомів магнію дають широкую інтенсивну смугу при 3400 cm^{-1} . Розрахунок за методом Г. В. Юхневича [16] для хвильових чисел при 3420 cm^{-1} та 3250 cm^{-1} дають значення енергії водневого зв'язку $E_{\text{H}(1)} = 19,2$ та $E_{\text{H}(2)} = 9,42 \text{ кДж/моль}$.

Такі значення відрізняються від значення енергії водневого зв'язку для $[\text{Mg}(\text{OH})_2]_n$ – $8,82 \text{ кДж/моль}$, що свідчить про протонно-донорний характер зародків порівняно з окристалізованою формою гідроксиду магнію. Відсутність смуги валентних коливань вільних гідроксид – груп при 3690 cm^{-1} свідчить про відсутність кристалічної структури осаду, яка складається з $[\text{Mg}(\text{OH})_2]_n$.

Зародки є рентгеноаморфними на відміну від кристалів, термографічний аналіз їх показує (рис. 4), що виділення структурної води при $75-90^\circ\text{C}$, $E_{\text{акт.}} = 9,42 \text{ кДж/моль}$ при $100-140^\circ\text{C}$, $E_{\text{акт.}} = 19,6 \text{ кДж/моль}$. Етап утворення первісних

частинок другого етапу проходить до 100°C (енергія активації $28,5 \text{ кДж/моль}$, що відповідає $E_{\text{H}(1)} + E_{\text{H}(2)}$). [17]. Термічне розкладання кристалів з третього етапу осаду проходить за $412-420^\circ\text{C}$, розкладання кристалів з третього етапу осаду відсутня дегідратація. Розкладання кристалів при розбавленні характеризується енергією активації $113-120 \text{ кДж/моль}$ на відміну від розкладання осаду з фрагментів поверхневих або лінійних груп з $E = 78,3-87 \text{ кДж/моль}$ що свідчить про досконалу структуру, нарощену при розбавленні [18].

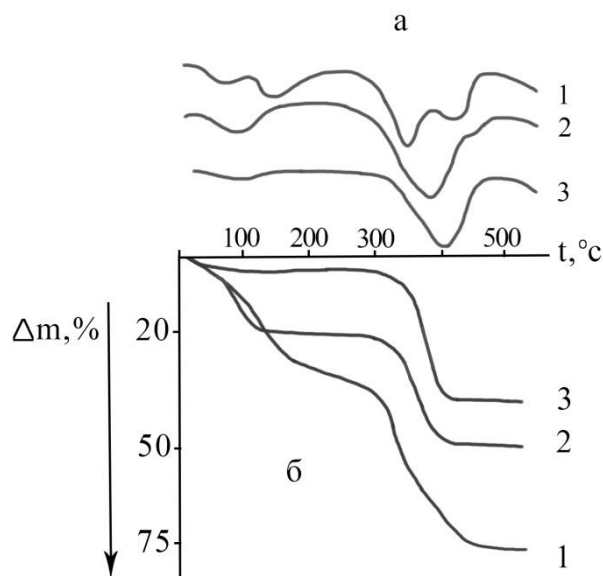


Рисунок 4 – Термографічний аналіз зразків осадів на різних стадіях формування (а – ДТА зміна температури зразків; б – ΔG - зміна маси зразків; $\Delta m, \%$ – втрата маси зразків):

1 – зародки; 2 – первісні частинки; 3 – кристали

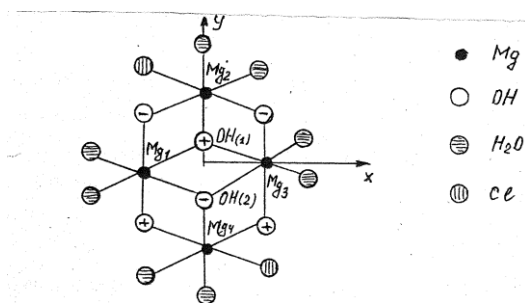


Рисунок 5 – Кластерна будова зародків гідроксиду магнію в умовах розбавлення

Склад зародків (частинок першої фази) відповідає $\text{Mg}_4(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ з молекулами води, що надають зародкам активний водневий зв'язок і які координовані разом з OH -групами (рис. 5). Будову зародків та їх склад разом з одержаними даними можливо уявити, виходячи зі структури

решітки гідроксиду магнію [18, 19]. В шарах кристалічної решітки одиничним ізольованим фрагментом є кластер складу $[\text{Mg}_4(\text{OH})_{16}]^{8-}$, який є координаційним октаедром гідроксид-іонів навколо кожного атому металу.

Така октаедрична структура зберігається і в зародках, склад яких за даними хімічного, спектроскопічного та термографічного аналізів свідчить про наявність груп OH^- і координованих молекул води навколо атомів магнію. Формула зародків (часток першої фази) відповідає $\text{Mg}_4(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ з координованими OH^- групами та молекулами води, що надають зародкам активний водневий зв'язок. Зародки мають будову і склад $\text{Mg}_4(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ з діаметром критичного зародка 2-3 нм, що відповідає середньому діаметру утворення з 4-х атомів магнію, 6-ти гідроксидних груп та 8 молекул води [18, 19].

На першому етапі утворення осаду проходить скаламучення розчину – утворення зародкових частинок осаду і зниження рН розчину. Надалі, на другому етапі, проходить перехід зародкових часток в первісні частки шляхом їх росту та полімеризації до $(30 \div 60)$ нм при постійному рН. На третьому, заключному, етапі триває утворення осаду за участю частинок другого етапу та моноядерних гідросокомплексів магнію MgOH^+ зв'язку. Утворення окристалізованої стабільної структури шляхом її орієнтованого нарощування з первісних частинок проходить після переходу всіх зародкових частинок у первісні і закінчується зрощуванням всіх первісних частинок другого етапу в стабільну кристалічну структуру гідроксиду магнію з розміром кристалів 500-1000 нм. Про такі особливості утворення осаду гідроксиду магнію при розбавленні концентрованих розчинів хлориду магнію, які містять лужні комплекси магнію, свідчать і дані по негативному заряду зародкових часток осаду по величині суспензійного ефекту, ΔpH (ефекту Доннана) (рис. 6).

Встановлено, що утворення осаду гідроксиду магнію у вивчених умовах проходить в кінетичному режимі, з порядком реакції на першій стадії $n_1 = 4$, а на стадії кристалізації $n_2 = 20$. Процес кристалізації лімітується пересиченням $S = a_{\text{Mg}^{2+}} \cdot a_{\text{OH}^-} / \text{ДР}_{\text{Mg}(\text{OH})_2}$, де $a_{\text{Mg}^{2+}}$ – активна концентрація іонів магнію в розчині після розбавлення, яка визначена з допомогою іон-селективного електроду, a_{OH^-} – активна концентрація гідроксид-іонів в розчині, що визначена потенціометричним методом.

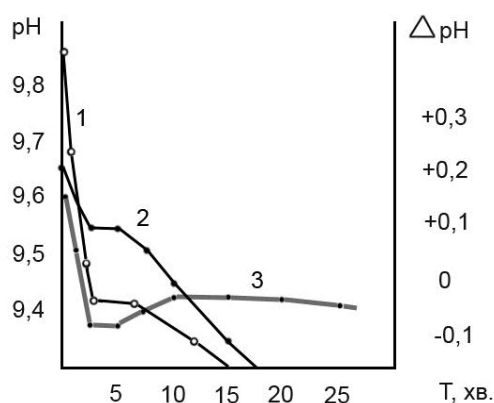


Рисунок 6 – Значення pH середовища при утворенні $\text{Mg}(\text{OH})_2$ при розбавленні лужних розчинів MgCl_2 : 1 – pH маточного розчину; 2 – pH суспензії; 3 – $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{мат.}} - \text{pH}_{\text{сусп.}}$.

Встановлено, що осад з кристалами найбільшого розміру і відповідно з високою швидкістю фільтрації при відділенні твердої фази від розчину, можна отримати при додержанні умов розбавлення лужних розчинів хлориду магнію. Як слідує з даних проведених досліджень, найбільш важливим показником є величина пересичення при значеннях $S \leq 20$ (рис. 7), що надає можливість одержати крупнокристалічний осад колектора, який задовільний для швидкої фільтрації та відділення розчину. Основний показник швидкості фільтрації $K_{\text{ф}} = 8 \cdot 10^{-3}$ м/год в нашому випадку вигідно відрізняється від відомих значень для гідроксиду магнію, осажденного лугом, що мають усереднене значення $K_{\text{ф}} = 8 \cdot 10^{-9}$ м/год [12].

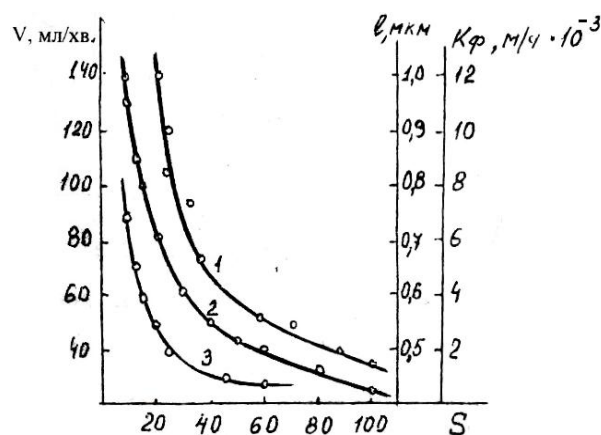


Рисунок 7 – Залежність властивостей осаду гідроксиду магнію від величини пересичення, дм^3 : 1 – розмір кристалів осаду (l , мкм); 2 – питома швидкість фільтрації (V , мл/хв); 3 – коефіцієнт фільтрації ($K_{\text{ф}}$, м/год $\cdot 10^{-3}$), S при розбавленні від 2,0 до 0,1 моль/дм³.

Розмір призматичних кристалів осаду гідроксиду магнію складає (500-1000) нм (рис. 8), а розмір кристалів осаду при звичайному лужному осадженні складає 42-75 нм.

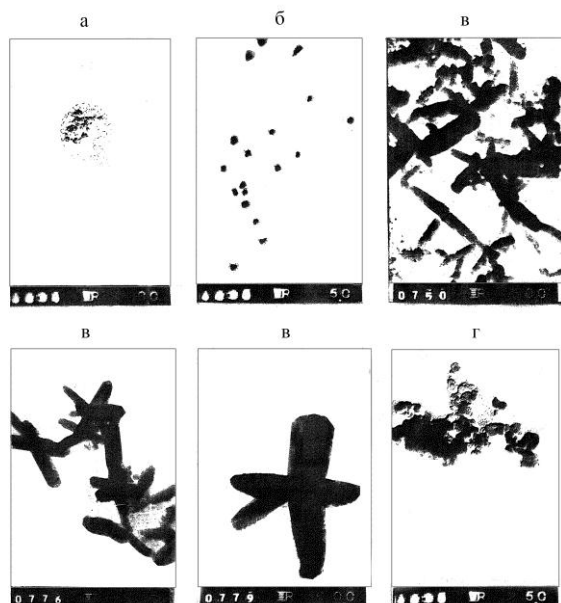


Рисунок 8 – Мікрофотографії частинок осаду гідроксиду магнію на різних стадіях осадження в умовах розбавлення: а – зародки; б – первісні частки; в – кристали; г – кристали лужного осадження. Електронний мікроскоп Hitachi H-500, вугільні репліки. Збільшення 85000 разів

Запропонований метод вивчення процесу осадоутворення гідроксиду магнію є методом виникаючих реагентів, завдяки якому можливо отримати крупнокристалічний осад. Такий метод не потребує створення особливих умов [21].

Математична обробка та апроксимація [22] експериментальних даних (рис. 7) дозволили знайти функціональну залежність властивостей осаду від величини пересичення, S при розбавленні у вигляді емпіричних формул:

$$l = 60,3/S^{1,25} \quad (1)$$

де l – розмір кристалів осаду, мм;

$$V = 620/S^{0,684}, \quad (2)$$

де V – питома швидкість фільтрації, мл / хв;

$$K_f = 0,16/S^{1,4}, \quad (3)$$

де K_f – коефіцієнт фільтрації, м/год $\cdot 10^{-3}$;
 S – величина пересичення.

Щодо впливу властивостей частинок осаду до видалення з розчину мікрокількостей іонів домішкових металів, встановлено, що найбільшу здатність до їх сорбції мають частки осаду першої стадії при утворенні зародкової фази [13].

Зародки мають полімерну структуру із кластерів $Mg_4(OH)_6Cl_2 \cdot 6H_2O$ (рис. 5), в складі яких є активні гідроксидні групи і молекули води, мають водневі зв'язки і здатні до хімічної взаємодії (сорбції) з гідролізованими при $pH \sim 9.0$ формами домішкових металів. Така взаємодія є основною і незворотною при подальшому осадоутворенні і кристалізації. Подібні процеси взаємодії мікрокількостей гідролізованих іонних форм металів негативно зарядженими поверхнями гідроксидів відомі з досліджень [13, 23].

Висновки.

Проведені дослідження направлені на досягнення високої хемосорбційної властивості гідроксиду магнію до більшості іонів домішкових металів та утворення при осадженні кристалічної структури з високими фільтраційними властивостями, що важливо для ефективності відокремлення осаду сорбента від очищених розчинів.

Вивчення впливу ступеню розбавлення лужномістких розчинів хлориду магнію на прикладі 2,0 моль/дм³ $MgCl_2$, що містить 0,1 г-моль/дм³ $NaOH$ показало, що оптимальною величиною розбавлення є величина в 500 разів. При цьому величина пересичення становила $S = [Mg^{2+}] \cdot [OH^-] / MP_{Mg(OH)_2} \approx 7$, що забезпечило значення коефіцієнту фільтрації $K_f = 8 \cdot 10^{-3}$ м/год, що перевищує відоме значення $K_f = 8 \cdot 10^{-9}$ м/год для гідроксиду магнію, осадженого звичайним лужним способом. Одержані результати досліджень придатні для всіх технологій отримання височистих сполук магнію з різного виду сировинних речовин, які містять іони магнію. Основою цих різноманітних технологій є необхідність застосовувати гідролізовані лугом і насичені гідроксокомплексамі магнію концентровані розчини хлориду магнію та поєднання різних прийомів їхнього застосування (розбавлення) в залежності від концентрації магнію в сировинному або вже в очищеному розчині солі магнію.

Проведені дослідження та отримані результати дозволяють застосовувати сполуки магнію (хлорид магнію, гідроксид та оксид магнію) в якості матеріалів для фармацевтичної промисловості та медицини. В останньому випадку способи застосування гідроксиду магнію можливі і для отримання високочистих сполук лужних металів, зокрема хлориду натрію в гемодіалізі і для приготування МР-фантомів у магнітно-резонансній томографії.

Іншим, дуже важливим результатом є забезпечення якості та достовірності при встановленні вмісту метал-іонів в різних

об'єктах методами нейтронно-активаційного, рентгено-флуоресцентного та атомно-абсорбційного аналізів. При виконанні аналізів дуже важливо, щоб матричний колектор не мав вмісту домішкових метал-іонів, що приводить до невірних результатів аналізів. На основі високочистої матриці з гідроксиду магнію можливе виготовлення порівняльних зразків для лабораторій та верифікація результатів проведених аналізів.

Список використаних джерел

1. Позин М. Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ч. 1. Изд. 4-е, испр. Л.: Химия, 1974. 792 с.
2. Масалимов А. В., Смирнов А. Н., Орехова Н. Н., Гришин И. А. Состояние сырьевой базы для обнаружения перспективных источников получения оксида магния в процессах обогащения. *Вестник забайкальского государственного университета имени Г. И. Носова*. 2021. Т. 27, № 3. С. 616-625. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45695631> (дата звернення 05.06.2021).
3. Тожимаматова М. Ё. Изучение процесса выделения соединений магния из доломитов месторождения Шорсу. *Universum: технические науки* : электрон. научн. журн. 2019. № 11 (68). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/8250> (дата звернення: 05.06.2021).
4. ИТС 21-2016. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям производства оксида магния, гидроксида магния, хлорида магния. URL: <http://docs.ru/dorument/1200143293> (дата звернення 05.06.2021).
5. Предварительный национальный стандарт ПНСТ 65-2015. Магний гидроксид наноструктурированный. Технические условия. Издание официальное. М. 2015. URL: <https://ru.wikipedia.org/гидроксид магния>.
6. Снегирев В. П., Яковлева Л. В., Снегирева Д. В., Алкмаева Л. Г. Соединения магния: лекарственные средства, их потребление и перспективы создания лекарственных украинского фармацевтического рынка нового препарата часть 1.100 магний содержащих. *Вестник фармации*. 2017. № 4 (78). С. 33-43.
7. Гидроксид магния в технологии XXI века. URL: <https://polit.ru/article/2015/07/07/nikohim/> (дата звернення 05.06.2021).
8. Гидроксид магния. Технологии и производство. *Евразийский химический рынок*. 2008. № 3(39). С. 102-119. URL: <http://www.chemmarket.info>. (дата звернення 05.06.2021).
9. Акчурина Т. К., Савченко А. В., Дробир И. Ю. Изучение процесса осаждения гидроксида магния из бишофита. *Сборник статей международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса»*. Волгоградский государственный технический университет. 2019. С. 253-257. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41745295> (дата звернення 05.06.2021).
10. Мацукевич И. В., Крутько Н. П., Овсеев Л. В. и др. Влияние метода получения на адсорбционные свойства наноструктурированного порошка MgO. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2018. Т. 54. № 3. С. 281-288. URL: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>. (дата звернення 05.06.2021).
11. Егоров Ю. В. Статика сорбции микрокомпонентов оксигидратами. М.: Атомиздат, 1975. 200 с.
12. Вассерман И. М. Химическое осаждение из растворов. Л.: Химия, 1980. 207 с.
13. Сичов М. І., Коломієць Л. В., Боряк К. Ф. Вивчення умов отримання сполук магнію особливої чистоти із його хлориду. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2017. Вип. 1 (10). С. 10-14.
14. Виноградова Е. Н. Влияние температуры и концентрации соли на pH при осаждении гидроксида магния. *Труды комиссии по аналитической химии*. Т. III (V. 10). М.: Изд-во АН СССР. 1951. С. 138-145.
15. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии, М.: Химия. 1979. 480 с.
16. Юхневич Г. В. Инфракрасная спектроскопия воды. М.: Наука, 1973. 208 с.
17. Веденеев В. И., Гурвич Л. В., Кондратьев В. Н. и др. Энергия разрыва химических связей. Справочник. Л.: Изд-во АН СССР. 1962. 215 с.
18. Колебания окисных решеток. Сборник под ред. Лазарева А. И. и Булавина М. О. М.: Наука, 1980. 365 с.
19. Чалый В. П. Гидроокиси металлов. Киев.: Наукова думка. 1972. 160 с.
20. Колинько П. А., Козлов Д. В. Химическая кинетика в курсе физической химии: учебно-методическое пособие. Новосибирский государственный университет. 2013. 99 с. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7140> (дата обращения: 09.06.2021).

21. Гомогенное осаждение. Справочник химика. Химия и химическая технология. Т. 21. URL: <https://chem21.info/info/9925/>
 22. Морозов В. В., Соболевский Б. Е., Шейнман И. Л. Методы обработки результатов физического эксперимента. Санкт-Петербург.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 64 с.
 23. Спосіб очищення сировинного розчину хлориду натрію від 3-D металів: Пат. на винахід UA 117942 C2: МПК8 C01D 3/04(2006.01), C01D 3/14(2006.01), C01D 3/16(2006.01), C02F1/62(2006.01), заявл. 25.07.2016; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 24.
- ### References
1. Pozin M. E. Tehnologija mineral'nyh solej (udobrenij, pesticidov, promyshlennyh solej, oksidov i kislot). Ch.1. Izd. 4-e, ispr. L.: Himija, 1974. 792 s.
 2. Masalimov A. V., Smirnov A. N., Orekhova N. N., Grishin I. A. Sostojanie syr'evoj bazy dlja obnaruzhenija perspektivnyh istochnikov poluchenija oksida iagnija v procesah obogashhenija. *Vestnik zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2021. T. 27, № 3. S. 616-625. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45695631> (data zvernennja 05.06.2021).
 3. Tozhimamatova M. Jo. Izuchenie processa vydelenija soedinenij magnija iz dolomitov mestorozhdenija Shorsu. *Universum: tehnicheckie nauki* : jelektron. nauchn. zhurn. 2019. № 11 (68). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/8250> (data zvernennja: 05.06.2021).
 4. ITS 21-2016. Informacionno-tehnicheckij spravocnik po nailuchshim dostupnim tehnologijam proizvodstva oksida magnija, gidroksida magnija, hlorida magnija. URL: <http://docs.ru/dokument/1200143293> (data zvernennja 05.06.2021).
 5. Predvaritel'nyj nacional'nyj standart PNST 65-2015. Magnij gidroksid nanostrukturirovanyj. Tehnicheckie uslovija. Izdanie oficial'noe. M. 2015. URL: https://ru.wikipedia.org/gidroksid_magnija.
 6. Snegirev V. P., Jakovleva L. V., Snegireva D. V., Alkmaeva L. G. Soedinenija magnija: lekarstvennye sredstva, ih potreblenie i perspektivy sozdaniya lekarstvennyh ukrainskogo farmacevticheskogo rynku novogo preparata chast' 1.100 magnij sodержashhih. *Vestnik farmicii*. 2017. № 4 (78). S. 33-43.
 7. Gidroksid magnija v tehnologii XXI veka. URL: <https://polit.ru/article/2015/07/07/nikohim/> (data zvernennja 05.06.2021).
 8. Gidroksid magnija. Tehnologii i proizvodstvo. *Evrasijskij himicheckij rynek*. 2008. № 3 (39). S. 102-119. URL: <http://www.chemmarket.info>. (data zvernennja 05.06.2021).
 9. Akchurin T. K., Savchenko A. V., Drobir I. Ju. Izuchenie processa osazhdenija gidroksida magnija iz bishofita. *Sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheckoj konferencii «Aktul'nye problemy i perspektivy razvitija stroitel'nogo kompleksa»*. Volgogradskij gosudarstvennyj tehnicheckij universitet. 2019. S. 253-257. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41745295> (data zvernennja 05.06.2021).
 10. Macukevich I. V., Krut'ko N. P., Poluchenija L., Ovseenko V. i dr. Vlijanie metoda na adsorbcionnye svoystva nanostrukturirovanogo poroshka MgO. *Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija himicheckih nauk*. 2018. T. 54. № 3. S. 281-288. URL: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>. (data zvernennja 05.06.2021).
 11. Egorov Ju. V. Statika sorbcii mikrokomponentov oksigidratami. M.: Atomizdat. 1975. 200 s.
 12. Vasserman I. M. Himicheckoe osazhdenie iz rastvorov, L.: Himija. 1980. 207 s.
 13. Sychoy M. I., Kolomiets L. V., Boriak K. F. Vychennia umov otrymannia spoluk mahniu osoblyvoi chystoty iz yoho khloridu. *Zbirnik naukovih prac' Odes'koj derzavnoi akademii tehnicheckogo reguluvannâ ta âkosti*. 2017. Vyp. 1 (10). S. 10-14.
 14. Vinogradova E. N. Vlijanie temperatury i koncentracii soli na rN pri osazhdenii gidroksida magnija. *Trudy komisii po analiticheckoj himii*. T. III (V. IO). M.: Izd-vo AN SSSR. 1951. C. 138-145.
 15. Lur'e Ju. Ju. Spravochnik po analiticheckoj himii. M.: Himija. 1979. 480 s.
 16. Juhnevich G. V. Infrakrasnaja spektroskopija vody. M.: Nauka, 1973. 208 s.
 17. Vedeneev V. I., Gurvich L. V., Kondrat'ev V. N. i dr. Jenergija razryva himicheckih svjazej. Spravochnik. L.: Izd-vo AN SSSR. 1962. 215 s.
 18. Kolebanija okisnyh reshetok. *Sbornik pod red. Lazareva A. I. i Bulavina M. O.* M.: Nauka, 1980. 365 s.
 19. Chal'j V. P. Gidrookisi metalov. Kiev.: Naukova dumka. 1972. 160 s.
 20. Kolin'ko P. A., Kozlov D. V. Himicheckaja kinetika v kurse fizicheckoj himii: uchebno-metodicheckoe posobie. Novosibirskij gosudarstvennyj universitet. 2013. 99 s. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7140> (data obrashhenija: 09.06.2021).

21. Gomogennoe osazhdenie Spravochnik himika. Himija i himicheskaja tehnologija. T. 21. URL: <https://chem21.info/info/9925/> vy`nahid UA 117942 C2: MPK8 C01D 3/04(2006.01), C01D 3/14(2006.01), C01D 3/16(2006.01), C02F1/62(2006.01), zayavl. 25.07.2016; opubl. 25.10.2018, Byul. #24.
22. Morozov V. V., Sobotkovskij B. E., Shejnman I. L. Metody obrabotki rezul'tatov fizicheskogo jeksperimenta. Sankt-Peterburg.: Izdatel'stvo SPbGJeTU «LJeTI», 2004. 64 s. Надійшла до редакції 08.09.2021
23. Sposib ochy`shhennya sy`rovy`nnogo rozchy`nu hlory`du natriyu vid 3-D metaliv: Pat. na

УДК 006.86

Л. В. Коломієць, д.т.н., А. М. Курмаш, Л. В. Кузнєцова

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса

ПИТАННЯ ВЕРИФІКАЦІЇ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ДИТЯЧИХ ІГРАШОК

Показано, що успішне функціонування випробувального обладнання і отримання достовірних результатів вимірювань забезпечується методиками верифікації робочих характеристик. Проведено аналіз міжнародних і вітчизняних стандартів, які регламентують процедуру атестації ВО, що застосовується при випробуванні дитячих іграшок.

Показано, що скасування стандарту «ГОСТ 24555-81 Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения», спричинило складну ситуацію в органах оцінки відповідності та випробувальних лабораторіях з підтвердження достовірності випробувань.

За результатами порівняльного аналізу наведені рекомендації стосовно необхідності розробки проекту стандарту «Випробувальне обладнання. Загальні вимоги до верифікації робочих характеристик». Розроблена методика первинної і періодичної верифікації робочих характеристик..

Ключові слова: валідація, верифікація, випробувальне обладнання, маятниковий копер, робочі характеристики, національний стандарт, методика верифікації.

Л. В. Коломієць, д.т.н., А. М. Курмаш, Л. В. Кузнєцова

ВОПРОС ВЕРИФИКАЦИИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ДЕТСКИХ ИГРУШЕК

Показано, что успешное функционирование испытательного оборудования и получение достоверных результатов измерений обеспечивается методиками верификации рабочих характеристик. Проведен анализ международных и отечественных стандартов, регламентирующих процедуру аттестации ИО, применяемую при испытании детских игрушек.

Показано, что отмена ГОСТ 24555-81 «Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения», привела к сложной ситуации в органах оценки соответствия и испытательных лабораториях по подтверждению достоверности испытаний.

По результатам сравнительного анализа приведены рекомендации по необходимости разработки проекта стандарта «Испытательное оборудование. Общие требования к верификации рабочих характеристик. Разработана методика первичной и периодической верификации рабочих характеристик.

Ключевые слова: валідація, верифікація, испытательное оборудование, маятниковый копер, рабочие характеристики, национальный стандарт, методика верификации.

QUESTION OF PERFORMANCE VERIFICATION OF EQUIPMENT FOR TESTING CHILDREN'S TOYS

The paper shows that the successful operation of test equipment and obtaining reliable measurement results is ensured by methods for verifying the performance of this equipment. Verification of test equipment characteristics includes a set of measures (analysis, metrological examination) aimed at assessing compliance with functional, operational, and regulatory requirements for test methods.

The analysis of international and domestic standards regulating the certification procedure for testing equipment used in testing children's toys, namely, the determination of the normalized accuracy characteristics of the equipment, their compliance with the requirements of regulatory documents and the establishment of the suitability of the equipment for operation, was carried out.

It is shown that the abolition of the standard «ГОСТ 24555-81 Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения», which regulated the metrological support of testing equipment, determining its suitability for use in product testing and the very process of equipment certification in Ukraine, led to a difficult situation in conformity assessment bodies and testing laboratories to confirm the reliability of tests.

Based on the results of comparative analysis, recommendations are given on the need to develop a draft National Standard of Ukraine «Test equipment. General requirements for verification of performance» following the requirements of domestic legislation in the field of technical regulation.

A methodology has been developed for primary and periodic verification of the performance of test equipment, used in assessing the conformity of electric toys in terms of «mechanical strength».

The study's purpose is to develop a methodology for primary and periodic verification of the performance characteristics of test equipment as the basis of the draft of the new National Standard of Ukraine.

Keywords: validation, verification, test equipment, pendulum hammer, performance, national standard, verification technique.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-14-21

Вступ

При оцінці відповідності, згідно Технічного регламенту про безпеку іграшок застосовують велику кількість випробувального обладнання (ВО) відповідно до стандартів [1] і [2].

Успішне функціонування ВО та отримання при цьому достовірних результатів вимірювань забезпечується методиками верифікації робочих характеристик. Верифікація характеристик ВО включає сукупність заходів (аналіз, метрологічна експертиза), спрямованих на оцінку відповідності функціональним, експлуатаційним і нормативним вимогам на методи випробувань.

Стандарт [3] визначає оцінку відповідності (ОВ), як «будь-який вид діяльності, пов'язаний з визначенням прямо або опосередковано того, що відповідні вимоги виконані».

Оцінка відповідності включає в себе відбір проб, проведення ряду випробувань, перевірку декларації постачальника про відповідність, сертифікацію та оцінку системи менеджменту та реєстрацію. Крім того, ОВ включає акредитацію компетентності цих видів діяльності. Хоча кожна з цих дій є окремою операцією, але вони тісно взаємопов'язані. Вибір найбільш придатних

процесів ОВ, а також якість, з якою виконується будь-який з них, може мати істотний вплив на надійність і впевненість стосовно результатів загальної ОВ [4].

Законодавча процедура ОВ випробування продукції передбачає застосування значної кількості засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та ВО.

Наказом від 25.12.2015 № 209 Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» з 01 січня 2018 року повинен був бути скасованим стандарт [5], який регламентував метрологічне забезпечення ВО, визначаючи його придатність до застосування при випробуваннях продукції, та сам процес атестації ВО в Україні. Термін скасування цього стандарту наказом від 07.11.2017 № 352 було перенесено на 01.01.2019. Скасування стандарту спричинило складну ситуацію в органах оцінки відповідності та випробувальних лабораторіях з підтвердження достовірності випробувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні право на розробку і впровадження національних стандартів надано Технічним

комітетам стандартизації (ТК) [6]. Це форма співробітництва заінтересованих юридичних та фізичних осіб з метою організації і виконання робіт з міжнародної, регіональної, національної стандартизації у визначених законом сферах діяльності та за закріпленими об'єктами стандартизації. До роботи в ТК залучаються уповноважені представники органів виконавчої влади, інших державних органів, організацій роботодавців та їх об'єднань, органів місцевого самоврядування, суб'єктів господарювання та їх громадських об'єднань, наукових установ та навчальних закладів, науково-технічних та інженерних товариств (спілок), громадських організацій споживачів (об'єднань споживачів), інших громадських об'єднань, професійних спілок, провідних науковців і фахівців.

Реформування економічних і соціальних відносин в Україні, розвиток національної системи стандартизації і технічного регулювання в цілому, визначення нормативно-правовими актами пріоритетів щодо інтеграції України в ЄС і вступу в Світову організацію торгівлі викликало потребу розробки нового законодавства в сфері технічного регулювання, а саме Законів України «Про стандартизацію», «Про підтвердження відповідності», «Про акредитацію органів з оцінки відповідності», що неминуче призвело до скасування ряду стандартів.

Аналіз діючих закордонних стандартів: де-юре видання стандарту з безпеки електричних іграшок США [7]; гармонізований стандарт ЄС «Іграшки електричні. Безпека», за показником п. 13 Механічна міцність [2]; стандарт Республіки Білорусь «Система забезпечення єдності вимірювань. Випробувальне обладнання. Загальні вимоги до атестації» [8]; стандарт Російської Федерації «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения» [9], а також публікацій з досвіду розробки програм і методик атестації ВО [10, 11], показав, що відсутність в Україні нормативного документу – стандарту, який би замінив скасований [5], є проблемою, яка потребує негайного вирішення з урахуванням нових редакцій основоположних стандартів [12], оскільки відсутня нормативна база стосовно верифікації робочих характеристик ВО, які задіяні при випробуваннях такої продукції, як іграшки.

Метою дослідження є розробка методики первинної та періодичної верифікації робочих характеристик ВО, як основи проєкту нового Національного стандарту України.

Виклад основного матеріалу

Достовірність результатів випробувань продукції досягається шляхом забезпечення єдності та точності вимірювань, а також відтворення і

підтримки з необхідною точністю заданих умов випробувань.

Для вирішення цих завдань необхідно мати об'єктивну інформацію про характеристики та стан не тільки ЗВТ, але й задіяного ВО.

Методика верифікації робочих характеристик ВО повинна стати основою для розробки проєкту стандарту України «Випробувальне обладнання. Загальні вимоги до верифікації робочих характеристик». Національний стандарт доречно віднести до системи стандартів забезпечення єдності вимірювань.

Нормативний документ повинен включати наступні заходи:

- загальні вимоги до проведення верифікації ВО;
- мету верифікації;
- види верифікації до початку експлуатації, в процесі експлуатації, після ремонту і модернізації та їх порядок здійснення;
- розробку проєктів програм і методик верифікації (ПМВ) робочих характеристик ВО;
- метрологічну експертизу проєктів ПМВ;
- погодження і затвердження ПМВ при отриманих позитивних результатах метрологічної експертизи;
- дослідження основних характеристик точності ВО;
- оформлення відповідних документів за результатами дослідження характеристик, а саме протоколу верифікації робочих характеристик та атестата про верифікацію ВО, при позитивних результатах робіт [10].

Важливою складовою проєкту нового стандарту, повинна бути процедура первинної верифікації ВО, яка дозволяє не тільки визначити технічні характеристики конкретного об'єкта, але й виконати наступні дії:

- провести експертизу всієї технічної і експлуатаційної документації на ВО;
- визначити метрологічні характеристики, за якими в подальшому буде проводитися верифікація устаткування.

Розділ стандарту «Розробка програми та методики верифікації робочих характеристик ВО» міститиме:

- ідентифікацію об'єкта (назва, призначення, позначення, заводської номер тощо);
- цілі і завдання верифікації;
- комплектність, перелік наданої технічної документації;
- перелік документів, на підставі яких проводять верифікацію;
- умови і порядок проведення верифікації;
- обсяг верифікації;
- матеріально-технічне та метрологічне за-

безпечення верифікації;

- вимоги до змісту і оформлення протоколів, порядок, місце та терміни зберігання матеріалів верифікації.

При проведенні метрологічної експертизи ПМВ основними критеріями оцінки правильності структурної побудови документів та викладу в них метрологічних і методологічних питань верифікації ВО є:

1. Оцінка обґрунтованості вибору та достатності складу параметрів, їх значень і допустимих відхилень, контрольованих при верифікації для визначення характеристик ВО.

Вірний вибір параметрів ВО і їх допустимих меж є одним з найважливіших етапів побудови ПМВ, тому саме при вирішенні цього питання у фахівців при розробці програми виникає найбільше проблем.

Основними технічними параметрами ВО, які вимагають визначення та підтвердження при верифікації, повинні бути відтворені параметри, які безпосередньо створюються для випробувань виробів.

Склад відтворюваних параметрів, а також їх допустимі відхилення, як правило, визначаються відповідно до технічних умов або програмами випробувань, експлуатаційної документації на ВО (паспорт, технічний опис), національними стандартами, в яких можуть бути викладені вимоги до ВО, що задіяні при випробуваннях виробів та ін.

Слід враховувати, що окрім відтворюваних параметрів, у ВО присутні й інші технологічні параметри, що відповідають вимогам техніки безпеки та забезпечують функціонування ВО. До таких технологічних параметрів можна віднести:

- характеристики мережі живлення, такі як напруга і частота змінного струму;
- геометричні розміри складових частин ВО, якщо вони не використовуються при розрахунках відтворюваних параметрів і не вимагають контролю із застосуванням ЗВТ;
- тиск в системі подання рідкого азоту у випробувальну камеру холоду, контрольований по індикаторних пристроях з метою оцінки правильності роботи насосної системи;
- опір ізоляції струмопровідних систем та ін.

Наступним етапом після визначення складу, діапазону і допустимих відхилень параметрів є вибір ЗВТ для контролю цих параметрів.

Засоби вимірювальної техніки слід вибирати, виходячи з його метрологічних характеристик, що дозволяють провести вимірювання параметра в необхідному діапазоні, при цьому межі похибки вибраного ЗВТ повинні

забезпечувати необхідну точність результатів вимірювань. При виборі ЗВТ його точність має бути достатньо високою у порівнянні з допустимим відхиленням вимірюваного параметра.

Для оцінки точності результатів вимірювань використовується коефіцієнт точності, який розраховується, як відношення допустимого відхилення параметра до похибки результатів вимірювань, основною складовою якої є сумарна похибка ЗВТ. Для забезпечення прийнятної точності і достовірності результатів вимірювань слід вибирати ЗВТ, виходячи зі значення коефіцієнта точності рівного трьом.

2. Оцінка відповідності точності результатів вимірювань і обробки вимірювальної інформації.

3. Оцінка обґрунтованості вибору ЗВТ і методик виконання вимірювань для проведення верифікації в ПМВ повинна містити розділ «Обробка, аналіз і оцінка результатів».

4. Оцінка правильності встановлення вимог до порядку обробки і представлення в протоколах верифікації результатів вимірювань.

5. Контроль правильності застосування в ПМВ випробувального обладнання термінів, визначень, найменувань величин і їхніх одиниць, повноти і правильності викладу питань метрологічного забезпечення [10].

З урахуванням вищевикладеного, як приклад, розглянемо розроблену методику первинної та періодичної верифікації маятникового копра для випробування іграшок на механічну міцність у відповідності до вимог [2].

Програма і методика первинної та періодичної верифікації робочих характеристик

Об'єктом верифікації є ВО – маятниковий копер, виготовлений власноруч в одиничному екземплярі у відповідності до встановлених технічних характеристик згідно стандарту [2, 13].

Випробувальне обладнання представляється на верифікацію робочих характеристик в такій комплектності: маятниковий копер; технічна документація (паспорт, креслення).

Технічні характеристики

ВО складається, з маятника, вісь обертання якого розташована в його верхньому кінці, і який під час руху утримується у вертикальній площині (рис. 1). Маятник складається з плеча необхідної жорсткості й ударника (рис. 2).

Коли маятник звільняють за допомогою спускового механізму, він падає тільки під дією сили тяжіння.

Ударник складається зі сталевго корпусу (сталь марки Ст2кп, СТ2пс або Ст2сп з поліамідним вкладишем напівсферичної форми).

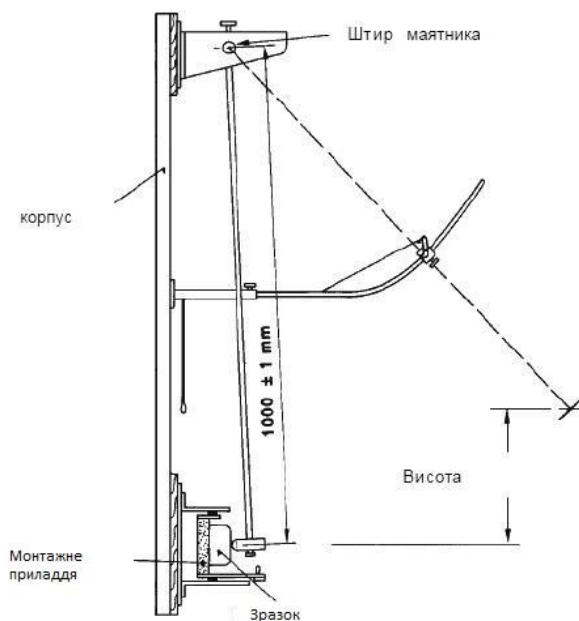
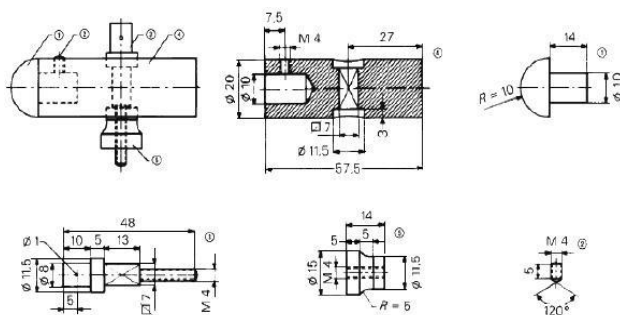


Рисунок 1 – Випробувальний копер [14]

Комбінована маса ударника, сума мас ударника і елементів кріплення системи.

Еквівалентна маса, маса умовного ударника, обчислена шляхом ділення на прискорення вільного падіння виміряного значення сили (в ньютонках), спрямованої уздовж вертикально розташованої осі ударника і необхідної для утримання плеча маятника в горизонтальному положенні.

Рисунок 2 – Ударник для маятнікового копра для енергії $\leq 0,7$ Дж [14]

Зразки розміщують на квадратному аркуші з клеєної фанери будь-якої марки товщиною 8 мм зі стороною 175 мм. Лист закріплений зверху і збоку бічних граней за допомогою жорсткої кріпильної скоби, що є частиною кріпильного пристосування (рис. 3). Кріпильне пристосування має масу $10 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$ і кріпиться на жорсткій рамі за допомогою болтів. Рама, в свою чергу, фіксується на твердій стіні.

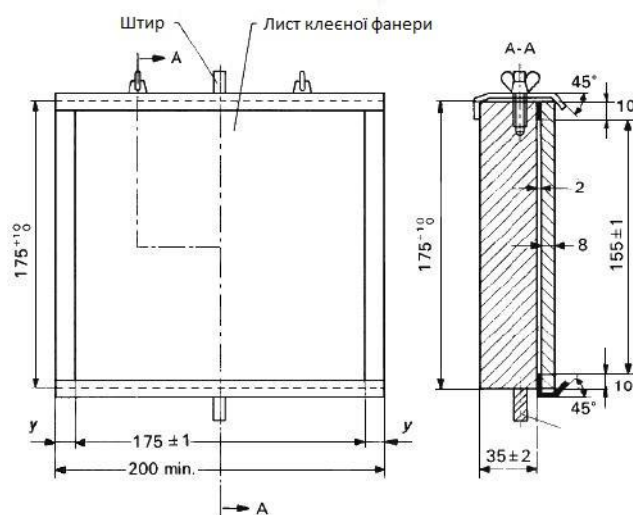


Рисунок 3 – Монтажене пристосування [14]

Пристрій кріплення повинен бути таким, щоб:

- а) зразок був розміщений таким чином, щоб точка удару лежала у вертикальній площині, що проходить через вісь стрижня маятника;
- б) зразок можна було пересувати горизонтально, а потім повертати навколо своєї осі перпендикулярно поверхні фанери;
- в) фанера може повертатися навколо вертикальної осі.

Проект програми та методики має розділ «Точнісні характеристики» (табл. 1), за якими здійснюють вибір засобів вимірювань.

Заходи безпеки під час верифікації

При проведенні верифікації необхідно дотримуватися правил техніки безпеки та виробничої санітарії, а також правил пожежної безпеки.

При проведенні верифікації вимірювання і випробування не становлять небезпеки для навколишнього середовища.

Умови проведення верифікації

- температура повітря $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- відносна вологість $(65 \pm 15) \%$.

Порядок проведення верифікації

Верифікація проводиться комісією у складі - представника випробувальної лабораторії та представника державних територіальних органів з метрології.

До роботи з проведення верифікації допускаються особи у віці не менш 18 років, що мають освіту не нижче середньотехнічної спеціальної, та які пройшли відповідний первинний інструктаж і мають дозвіл на самостійну роботу.

Таблиця 1 – Характеристики точності

Найменування нормованих характеристик	Номинальні значення	Допустимі відхилення нормованих характеристик
Твердість сталевому корпусу за Роквелом HRE	80-85	$\pm 2 \%$
Твердість за Роквелом HRR поліамідного вкладиша напівсферичної форми	85-100	$\pm 2 \%$
Комбінована маса ударника, г	200	± 1
Еквівалентна маса, кг	0,25	$\pm 2 \%$
Сила, спрямована уздовж вертикально розташованої осі ударника, Н	1	$\pm 2 \%$
Відстань між віссю плеча і вимірювальною точкою, мм	1000	± 1
Висота переміщення по вертикалі, мм	280	$\pm 1 \%$
Геометричні розміри, мм: - зовнішній діаметр сталеві трубки плеча - товщина стінки	9 0,5	$\pm 0,2$ $\pm 0,2$
Геометричні розміри ударника, мм:		
R	10	$\pm 0,2$
D	20	$\pm 0,2$
f	9	$\pm 0,2$
I	57,5	$\pm 0,2$
монтажного пристосування, мм:		
висота	175	+ 10
ширина	200	не менше
товщина	35	± 2
фанери монтажного пристосування, мм		
ширина	175	± 1
товщина	8	не менше
Маса монтажного пристосування, кг	10	± 1

Методика проведення первинної та періодичної верифікації робочих характеристик

1 Наявність технічної документації:

- програми і методики первинної та періодичної верифікації;
- технічної документації (паспорт, креслення);
- наявність свідоцтва про калібрування ударника за показником «комбінована маса».

Зовнішній огляд:

При зовнішньому огляді встановлюють:

- комплектність;
- відповідність зовнішнього вигляду вимогам

технічної документації;

- відсутність корозії металу на робочій поверхні;

- працездатність пристрою, це контроль не допустимості вторинних ударів, тобто, віддача або відскік ударника. Удари повинні бути прикладені перпендикулярно поверхні, яку випробують.

2 Твердість сталевому корпусу і поліамідного вкладиша напівсферичної форми вимірюють методом безпосередньої оцінки стаціонарним твердоміром TP 5008, діапазони вимірювань твердості по Роквеллу 20-88 HRA, 20-100 HRB, 20-70 HRC, 40-77 HRD, 70-100 HRE, 60-100 HRF, 30-94 HRG, 80-100 HRH, 40-100 HRK.

Похибка шкали твердості HRA, HRB, HRC, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK, HRL, HRM, HRP, HRR, HRS, HRV $\delta \pm 2 \%$ [15, 16].

3 Комбінована маса ударника визначається згідно [17]. Ударник повинен мати діюче свідоцтво, яке підтверджує термін калібрування за показником «комбінована маса» – сума мас ударника і елементів кріплення системи.

4 Еквівалентну масу визначають не прямим методом. Вимірюють силу, спрямовану уздовж вертикально розташованої осі ударника і необхідну для утримання плеча маятника в горизонтальному положенні, на висоті переміщення по вертикалі – 280 мм, за допомогою динамометра PCE-DFG N 2 до 2 Н (0,2 кг) $\pm 0,1 \%$.

Еквівалентна маса розраховується як сума комбінованої маси і половини маси плеча.

Маса плеча розраховується за вимірюваною силою діленням на прискорення вільного падіння 10 м/с^2 [18].

Вимірювання сили (в Н), спрямованої уздовж вертикально розташованої осі ударника.

Значення комбінованої маси для розрахунку, згідно свідоцтва калібрування.

Вимірювання геометричних розмірів проводяться методом безпосередньої оцінки.

Відстань між віссю плеча і вимірювальною точкою та висоту переміщення по вертикалі визначають лінійкою металевою вимірювальною Л 1000 ц.п. 1 мм.

5 Геометричні розміри сталеві трубки плеча, ударника, монтажного пристосування, фанери монтажного пристосування визначають штангенциркулем ШЦ-II-250-0,1 М.

6 Вимірювання маси монтажного пристосування проводять методом безпосередньої оцінки за допомогою ваг електронних лабораторних Axis BDM 15, 4 класу точності.

Всі вимірювання проводять тричі. За

результатами вимірювань розраховується середнє значення. Результати вимірювань заносяться до протоколу атестації.

Оформлення результатів верифікації

Задовільними вважаються такі результати, які відповідають вимогам діючої програми та методики, технічної документації.

При позитивних результатах верифікації оформлюється атестат. У випадку, коли маятниковий копер не відповідає вимогам діючої програми результати верифікації вважаються незадовільними.

Випробувальне обладнання, яке пройшло верифікації з позитивними результатами, ставлять на технічний облік у встановленому на підприємстві порядку та вносять у перелік періодичної верифікації та у перелік калібрування (для ударника). Періодичність верифікації встановлюється один раз на рік.

Висновки

В результаті проведеного у роботі аналізу міжнародних і вітчизняних стандартів, які регламентують процедуру атестації ВО, що застосовується при випробуванні дитячих іграшок, виявлено, що успішне функціонування ВО та отримання при цьому достовірних результатів вимірювань забезпечується методиками верифікації робочих характеристик.

Показано, що скасування стандарту «ГОСТ 24555-81 Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения», який регламентував метрологічне забезпечення ВО, визначаючи його придатність до застосування при випробуваннях продукції та сам процес атестації обладнання в Україні, спричинило складну ситуацію в органах оцінки відповідності та випробувальних лабораторіях з підтвердження достовірності випробувань.

Авторами розроблено методику первинної і періодичної верифікації робочих характеристик ВО для випробування дитячих іграшок, яка застосовується при ОБ електричних іграшок за показником «механічна міцність» і можуть стати основою для розробки Національного стандарту України «Випробувальне обладнання. Загальні вимоги до верифікації робочих характеристик» на заміну скасованого стандарту [5].

Список використаних джерел

1. ДСТУ EN71-1:2016 (EN71-1:2014, IDT) Безпечність іграшок. Частина 1. Механічні і фізичні властивості.
2. ДСТУ EN 62115:2015 Іграшки електричні. Безпека (EN 62115:2005; A2:2011; A11:2012;

A2:2011/AC:2011; A11:2012/AC:2013; A12:2015, IDT).

3. ДСТУ 1.1:2015 (ISO/IEC Guide 2:2004, MOD) Національна стандартизація. Стандартизація та суміжні види діяльності. Словник термінів.

4. National Conformity Assessment Principles For the U.S. URL: https://www.standardsportal.org/usa_en/conformity_assessment/conformity_assessment.aspx.

5. ГОСТ 24555-81 «Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения».

6. Закон України «Про стандартизацію» від 05 червня 2014 року, № 1315-VII.

7. ANSI/UL 696 Standard for Electric Toys.

8. СТБ 8015-2016 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Испытательное оборудование. Общие требования к аттестации».

9. ГОСТ Р 8.568-2017 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. ОП.

10. Алимов С. С., Тулянцева Т. С., Рагозин М. П., Николаев Е. С. Из опыта разработки программ и методик аттестации испытательного оборудования. *Менеджмент. Вооружение. Качество*. 2018. 3(57). С. 154-158. Режим доступа: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/7/article_7028_341.pdf

11. Писарев В. Н. К проблеме аттестации испытательного оборудования, используемого в сфере обороны и безопасности. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*: в 2-х т. Пенза: ПГУ, 2015. Т. 2. С. 346-349. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-proble-me-attestatsii-ispytatelnogo-oborudovaniya-ispol-zuemogo-v-sfere-oborony-i-bezopasnosti11>.

12. Чернега І. М. Нові редакції основоположних стандартів. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2016. № 1(98). С. 19-21. Режим доступа: http://tc.terminology.lp.edu.ua/TK_Work/hinzburg_kovalenko_kl'un'_SSJa_2016_N1.pdf.

13. ДСТУ 1.5:2015 (ISO/IEC Directives Part 2:2011, NEQ). Національна стандартизація. Правила розроблення, викладання та оформлення національних нормативних документів. [Чинний від 2017-02-01].

14. IEC 60068-2-75:2014 Environmental testing – Part 2-75: Tests – Test Eh: Hammer tests.

15. ДСТУ ISO 2039-1:2015 (ISO 2039-1:2001, IDT) Пластмаси. Визначення твердості. Частина 1. Метод вдавлювання кульки.

16. DSTU ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT).

17. МК 02-03:2015 Гирі еталонні та загального призначення. Методика калібрування. ДП «Укрметртестандарт».

18. Казачек Е. Аттестация испытательного оборудования. *Вектор высоких технологий*. 2013. № 5 (5). С. 50-53. Режим доступа: <https://ostec-vacuum.ru/upload/iblock/903/publication.pdf>.

References

1. DSTU EN71-1:2016 (EN71-1:2014, IDT) Bezpechnist ihrashok. Chastyna 1. Mekhanichni i fizychni vlastyvoli.

2. DSTU EN 62115:2015 Ihrashky elektrychni. Bezpeka (EN 62115:2005; A2:2011; A11:2012; A2:2011/AC:2011; A11:2012/AC:2013; A12: 2015, IDT).

3. DSTU 1.1:2015 (ISO/IEC Guide 2:2004, MOD) Natsionalna standartyzatsiia. Standartyzatsiia ta sumizhni vydy diialnosti. Slovyk terminiv.

4. National Conformity Assessment Principles For the U.S. URL: https://www.standardsportal.org/usa_en/conformity_assessment/conformity_assessment.aspx.

5. GOST 24555-81 «Sistema gosudarstvennykh ispytaniy produkciy. Poryadok attestatsii ispytatel'nogo oborudovaniya. Osnovnye polozheniya».

6. Zakon Ukrainy «Pro standartyzatsiiu» vid 05 chervnia 2014 roku, # 1315-VII.

7. ANSI/UL 696 Standard for Electric Toys.

8. STB 8015-2016 «Sistema obespecheniya edinstva izmereniy Respubliki Belarus'. Ispytatel'noe oborudovanie. Obshhie trebovaniya k attestatsii».

9. GOST R 8.568-2017 GSI. Attestatsiya ispytatel'nogo oborudovaniya. OP.

10. Alimov S. S., Tulyanceva T. S., Ragozin M. P., Nikolaev E. S. Iz opyta razrabotki programm i metodik attestatsii ispytatel'nogo oborudovaniya. *Menedzhment. Vooruzhenie.*

Kachestvo. 2018. 3(57). S. 154-158. Rezhim dostupa:

http://www.electronics.ru/files/article_pdf/7/article_7028_341.pdf

11. Pisarev V. N. K probleme attestatsii ispytatel'nogo oborudovaniya, ispol'zuemogo v sfere oborony i bezopasnosti. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*: v 2-x t. Penza: PGU, 2015. T. 2. S. 346-349. Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-proble-me-attestatsii-ispytatelnogo-oborudovaniya-ispol-zuemogo-v-sfere-oborony-i-bezopasnosti11>.

12. Cherniha I. M. Novi redaktsii osnovopolozhnykh standartiv. *Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist*. 2016. # 1(98). S. 19-21. Rezhim dostupa: http://tc.terminology.lp.edu.ua/TK_Work/hinzburg_kovalenko_kl'un'_SSJa_2016_N1.pdf.

13. DSTU 1.5:2015 (ISO/IEC Directives Part 2:2011, NEQ) Natsionalna standartyzatsiia. Pravyla rozroblennia, vykladannia ta oformlennia natsionalnykh normatyvnykh dokumentiv. [Chynnyi vid 2017-02-01].

14. IEC 60068-2-75:2014 Environmental testing – Part 2-75: Tests – Test Eh: Hammer tests.

15. DSTU ISO 2039-1:2015 (ISO 2039-1:2001, IDT) Plastmasy. Vyznachennia tverdosti. Chastyna 1. Metod vdavliuvannia kulky.

16. DSTU ISO 6508-1:2013 Metalevi materialy. Vyznachennia tverdosti za Rokvellom. Chastyna 1. Metod vyprobuвання (shkaly A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT).

17. МК 02-03:2015 Ghyri etalonni ta zaghalnogho pryznachennia. Metodyka kalibruvannia. DP «Ukrmetrtestandart».

18. Kazachek E. Attestatsiya ispytatel'nogo oborudovaniya. *Vektor visokix texnologij*. 2013. № 5 (5). С. 50-53. Rezhim dostupu: <https://ostec-vacuum.ru/upload/iblock/903/publication.pdf>.

Надійшла до редакції 10.06.2021

РОЗДІЛ 2

Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення

УДК 621.56

В. І. Мілованов, д.т.н., Д. О. Балашов*Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса***ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ЯКІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ МАЛОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ**

У статті наведена інформація про перспективи використання наночастинок для покращення характеристик теплообмінних апаратів холодильної машини, що працює на ізобутані. Вплив нанодомішок в холодоагент розглянуто на прикладі експериментального дослідження конденсатора. Дослідження показало високу перспективність застосування в малих холодильних машинах конденсаторів типу «труба в трубі» і можливості суттєвого підвищення їх теплообмінних характеристик шляхом застосування нанофлюїдів в якості холодоагенту. Результати свідчать про підвищення коефіцієнта теплопередачі в конденсаторі на 4,5-16 %.

Ключові слова: холодильна машина, компресор, калориметричний стенд, наночастинка, нанодомішка, нанофлюїд, коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт тепловіддачі, конденсатор, холодоагент, ізобутан.

В. И. Милованов, д.т.н., Д. А. Балашов**ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ МАЛОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ**

В статье приведена информация о перспективах использования наночастиц для улучшения характеристик теплообменных аппаратов холодильной машины, работающей на изобутане. Влияние нанопримесей в хладагент рассмотрено на примере экспериментального исследования конденсатора. Исследование показало высокую перспективность применения в малых холодильных машинах конденсаторов типа "труба в трубе" и возможности существенного повышения их теплообменных характеристик путем применения нанофлюидов в качестве хладагента. Результаты свидетельствуют о повышении коэффициента теплопередачи в конденсаторе на 4,5-16 %.

Ключевые слова: холодильная машина, компрессор, калориметрический стенд, наночастица, нанофлюид, коэффициент теплопередачи, коэффициент теплоотдачи, конденсатор, хладагент, изобутан.

V. I. Milovanov, DSc, D. O. Balashov**INFLUENCE OF NANOPARTICLES ON THE QUALITY OF WORK OF HEAT EXCHANGERS OF A SMALL REFRIGERATOR**

In recent years, a new direction of energy saving in small refrigeration machines has been widely studied in the world, namely the use of new classes of substances as a working fluid. Studies of the thermophysical properties of colloidal solutions of nanoparticles with oils and refrigerants show the high prospects for the use of this class of substances in refrigeration. Therefore, the task of studying heat exchangers operating as part of small refrigeration machines on nanofluids seems relevant. The article provides information on the prospects for the use of nanoparticles in heat exchangers of a refrigeration machine running on isobutane. The influence of nano impurities is considered in the example of theoretical and experimental study of the capacitor. At the same time, modern studies of the influence of nanofluids on the heat exchange characteristics of heat exchangers of refrigeration machines were taken into account. Experimental study of a small refrigeration machine running on isobutane with nanoparticle impurities was performed on a calorimetric stand, which allows the machine to operate in a wide range of modes with support for specified cycle parameters and high-precision determination of the key performance of all elements of the refrigerator, including compressors and heat exchangers. The study showed the high prospects for the use in small refrigeration machines of condensers such as "pipe in a pipe" and the possibility of significantly improving their heat transfer characteristics through the use of nanofluids as a refrigerant. The results show an increase in the

heat transfer coefficient in the condenser by 4.5-16 %.

Keywords: refrigeration machine, compressor, calorimetric stand, nanoparticle, nanodump, nanofluid, heat transfer coefficient, heat transfer coefficient, condenser, refrigerant, isobutane.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-23-30

Вступ

Ефективним напрямком в енергозбереженні, яке дозволяє знизити споживання електроенергії, є застосування нових класів речовин в якості робочого тіла. Проведені в Україні та за кордоном дослідження теплофізичних властивостей колоїдних розчинів наночастинок з мастилами і холодоагентами показують високу перспективність використання подібного класу речовин в холодильній техніці. Використання нанофлюїдів дозволяє істотно підвищити теплообмінні характеристики холодоагенту, підвищити ефективність роботи теплообмінних апаратів і, в результаті, знизити споживану холодильною машиною електричну потужність.

З аналізу опублікованої в науковій літературі інформації про вплив наноматеріалів на роботу малих холодильних машин видно, що більшість робіт присвячено дослідженню теплопровідності речовин з розчиненими в них наночастинами. Дані про вплив нанодобавок на роботу конкретних теплообмінних апаратів малої холодильної машини в літературі практично відсутні. Це ускладнює пошук технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності малих холодильних машин, домашньої і торгової холодильної техніки.

Таким чином, стають актуальними роботи з подальших досліджень малих холодильних машин з нанофлюїдами в якості робочого тіла.

Зменшити споживання холодильної машиною електроенергії можливо за допомогою поліпшення ефективності теплообмінних систем. Нові теплоносії з поліпшеними тепломасообмінними характеристиками є одним з варіантів покращення теплопередачі в теплообмінних апаратах малих холодильних машин. Важливим досягненням в дослідженні теплоносіїв є застосування колоїдної суміші холодоагенту, мастила і металевих нановключень розміром 1-100 нанометрів. Перші варіанти колоїдних розчинів, такі як мікрофлюїди, приводили до утворення осаду, що викликало ерозію поверхонь тертя металевих деталей. Нанофлюїди утворюються як розчин базової рідини, наприклад суміші холодоагенту з мастилом, з наночастинами, які не утворюють хімічних сполучень з цією рідиною [1]. Їх застосування може суттєво підвищити теплопередачу в теплообмінних апаратах холодильних устано-

вок навіть коли відносний обсяг наночастинок менше, ніж 0,3% [2].

Підвищена теплопровідність є наслідком рівномірної дисперсії часток. Хоча теплопровідність є функцією основних параметрів базової рідини, таких як тиск і температура, в турбулентному потоці ефективна теплопровідність через вплив турбулентних вихорів значно підвищується. Наявність наночастинок в рідині є одним з факторів суттєвого підвищення її турбулізації [3].

Унікальними властивостями нанофлюїдів є підвищена теплопровідність, в'язкість і теплопередача. Відомо, що теплопровідність металів при кімнатній температурі вище, ніж у рідин. Тому теплопровідність рідини з частинками металу вище, ніж у звичайної рідини. Аналіз показав, що число Нусельта нанофлюїдів вище, ніж у базової рідини, при певних параметрах потоку (наприклад, при рівних числах Рейнольдса) [4]. Підвищені числа Нусельта в поєднанні з більшою теплопровідністю забезпечують більш високу конвективну теплопередачу нанофлюїду в порівнянні з базовим теплоносієм. Це повинно відобразитись на тепломасообмінних характеристиках теплообмінних апаратів холодильної машини.

Об'єкт дослідження

Об'єкт дослідження – процеси теплопередавання в конденсаторі малої холодильної машини, що працює на ізобутані чистому і з домішками наночастинок оксиду титану.

Перший етап даних досліджень і методика експериментального випробування були викладені в роботі [6]. В цій роботі представлено матеріали розширеного теоретичного аналізу проблеми і завершальний етап експериментальних робіт.

Аналіз літературних даних

В сучасній науково-технічній літературі освітлюється великий обсяг теоретичних робіт по проблемі ефективної теплопровідності дво- і багатокомпонентних матеріалів, наприклад, підхід Гамільтона і Кроссерата інші. Гамільтон і Кроссер [7] ввели фактор впливу форми n , який визначається експериментально для різних типів матеріалів. Метою їх дослідження була розробка моделі як функції форми частинок, складу і теплопровідності обох фаз:

$$k_c = k_f \left[\frac{k_p + k_f(n-1) - (n-1)V_p(k_f - k_p)}{k_p + k_f(n-1) + V_p(k_f - k_p)} \right],$$

де n – фактор впливу форми частинок, виведений емпірично (сферичний $n = 3$) і визначається як $n = 3/\psi$;

ψ – сферичність, визначена як відношення площі поверхні сфери з об'ємом, рівним обсягу частки, до площі поверхні частки;

k_c – загальна теплопровідність;

k_f – теплопровідність рідини;

k_p – теплопровідність матеріала наночастинок;

V_p – об'ємна доля наночастинок.

Модель Гамільтона-Кроссера зводиться до моделі Максвелла при $\psi = 1$ і узгоджується з експериментальними даними. Модель вірна до тих пір, поки теплопровідність часток більше теплопровідності рідини принаймні в 100 разів. Незважаючи на те, що експерименти показують достатню придатність цих моделей в прогнозуванні теплопровідності, вони не враховують вплив розміру наночастинок.

Для успішного практичного застосування нанофлюїдів необхідно повне розуміння процесів вимушеної конвекції в ламінарному і турбулентному потоці. Нанофлюїди по суті є багатокомпонентними рідинами. В літературі вони розглядаються або як двофазний гомогенний потік без ковзання між частинками і рідиною, які теж перебувають в стані частинок щодо базової рідини з температурною рівновагою.

Більшість потоків з вимушеною конвекцією залежать від чисел Рейнольдса і Прандтля, але в разі нанофлюїдів включаються додаткові параметри, що враховують термічні властивості всіх складових. Коефіцієнт теплопровідності нанофлюїда буде залежати від теплопровідності і теплоємності базової рідини і наноматеріалів, картини потоку, критеріїв Прандтля і Рейнольдса, температури, об'ємної долі розчинених часток, їх розмірів і форми.

Інший можливий метод формулювання, запропонований тими ж авторами, полягає в припущенні, що відношення коефіцієнтів теплопередачі нанофлюїда K_{nf} і базової рідини K_f пропорційне відношенню відповідних теплопровідностей нанофлюїда h_{nf} і базової рідини h_f , піднесених до степеня m

$$h_{nf} \approx h_f \left(\frac{K_{nf}}{K_f} \right)^m,$$

де показник залежить від режиму течії й імовірно дорівнює 2/3 для турбулентного потоку. Методи, згадані вище, розглядають нанофлюїд як однофазну рідину, на відміну від реальності, де він є сумішшю рідини і твердих часток. Роз-

мір розчинених часток викликає деякі труднощі при аналізі їх взаємодії з рідиною в процесі передачі тепла. Багато дослідників припускають, що броунівський рух є одним з чинників поліпшення теплопровідності. Цей випадковий рух надмалих частинок надає швидкість твердим часткам відносно рідини. Також припускають вплив на теплопровідність малих відхилень (збурень) температури і швидкості внаслідок впливу броунівського руху.

Як було зазначено вище, існують два підходи до визначення коефіцієнта теплопровідності в потоці. Один з підходів – традиційний із застосуванням термічних властивостей нанофлюїда з відомими поправками для коефіцієнта теплопередачі в базовій рідині. Для нанофлюїдів застосовуються такі вирази [7]:

$$\rho_{eff} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_n;$$

$$c_{p,eff} = (1 - \phi)c_{p,f} + \phi c_{p,n};$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_n.$$

де ρ – щільність;

c – теплоємність;

ϕ – масова доля часток;

індекси p в цій формулі і далі відносяться до часток, f – до рідини, eff – до ефективного параметра.

В роботі [9] була запропонована відома формула Ейнштейна для розрахунку ефективної в'язкості, μ_{eff} :

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 2,5\phi) \text{ для } \phi < 0,05.$$

Рівняння Ейнштейна згодом було розширено [8]

$$\mu_{eff} = \mu_f \frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}}.$$

Для $\phi < 0,05$ і сферичних частинок може бути використаний такий вираз [9]:

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 2,5\phi).$$

Ефективна теплопровідність може бути виведена з моделей теплопровідності Максвелла і Гамільтона. Критерії Прандтля, Рейнольдса та Нусельта розраховуються так [10]:

$$Pr = \frac{\mu_{eff} c_{p,eff}}{K_{eff}}; \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho_{eff} u d}{\mu_{eff}}; \quad (2)$$

$$Nu = \frac{h d}{K_{eff}}. \quad (3)$$

де u – швидкість рідини;

d – діаметр каналу,

h – довжина розрахункової ділянки.

Наприклад, для повністю розвинутого ламінарного потоку при граничних умовах постійної температури стінки

$$Nu_T = \frac{hd}{K_{eff}} = 3,657. \quad (4)$$

Для турбулентного потоку існує поправка Петухова-Кирилова [11]

$$Nu = \frac{hd}{K_{eff}} = \frac{(f/8) Re \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \sqrt{(f/8)(Pr^{2/3} - 1)}} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^n, \quad (5)$$

де $n = 0,11$ для $T_{ст} > T_{ж}$, $n = 0,25$ для $T_{ст} < T_{ж}$;

$$f = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}.$$

Поправка може використовуватися для розрахунку коефіцієнтів теплопередачі при течії в каналі для ламінарного і турбулентного потоків з використанням відомих властивостей нанофлюїдів. Результати можуть бути порівнянні з експериментальними за таких же умов.

При другому підході необхідно знайти рішення основних рівнянь при певних граничних умовах. У цих випадках рівняння збереження маси, моменту і енергії, добре відомі для однофазного потоку, можуть бути розширені для нанофлюїдів. Якщо мікроконвекцією і мікродифузиею розчинених частинок (гідродинамічна дисперсія) знехтувати, то ці два підходи в результаті дадуть менші коефіцієнти теплопередачі, ніж експеримент.

Основні рівняння можна вирішити, зробивши припущення, що нанофлюїд стискається без тертя між частинками і рідиною, але вони знаходяться в термодинамічній рівновазі [10].

Рівняння збереження маси

$$dv(\rho \bar{V}) = 0.$$

Рівняння збереження моменту

$$dv(\rho \bar{V}^2) = -gradP + \mu \nabla^2 \bar{V}.$$

Рівняння збереження енергії

$$dv(\rho \bar{V} c_p T) = dv(K gradT).$$

Ці рівняння можуть бути спрощені в залежності від вигляду необхідного рішення.

Для повністю розвинутого ламінарного потоку профіль епюри швидкостей параболічний

$$\frac{u}{\bar{u}} = 2 \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right),$$

де $\bar{u}$ – середня швидкість в осьовому напрямку. Якщо знехтувати теплопровідністю в осьовому напрямку, то рівняння можна записати так:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[Dr \frac{\partial T}{\partial r} \right].$$

Рівняння енергії в будь-якій формі має вирішуватися з встановленими граничними умовами постійної температури стінки або постійного теплового потоку з постійною температурою входу.

Останнім часом багато опублікованих робіт зосереджено на вимірі і визначенні властивостей нанорідин, особлива увага приділяється теплопровідності і коефіцієнту теплопередачі.

Класичне рішення Граца для рівняння при ідеальному потоці, $u = \text{const}$, для граничних умов постійної температури стінки [11]:

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K} = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} e^{-4\lambda_m^2 (x/d)/Pe}}{\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m^2} e^{-4\lambda_m^2 (x/d)/Pe}}; \quad (6)$$

$$Pe = \frac{U_m d}{\alpha_{eff}}. \quad (7)$$

де α – температуропровідність.

Класичне рівняння Граца може бути розширене для граничних умов постійного теплового потоку, постійної температури стінки і лінійної температури стінки з параболічним профілем швидкостей. Використовуючи параболічний профіль швидкостей, визначають локальні числа Нусельта [12]:

- постійна температура стінки

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K_{eff}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\lambda_n^2 \zeta}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\lambda_n^2} e^{-\lambda_n^2 \zeta}};$$

- постійний тепловий потік

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K_{eff}} = \left[\frac{11}{48} - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta_n^2 \zeta}}{A_n \beta_n^4} \right]^{-1};$$

- лінійна температура стінки

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K_{eff}} = \frac{\frac{1}{2} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{2} \cdot \frac{R'_n(1)}{\lambda_n^4} e^{-\lambda_n^2 \zeta}}{\frac{11}{96} + 8 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{2} \cdot \frac{R'_n(1)}{\lambda_n^4} e^{-\lambda_n^2 \zeta}},$$

$$\text{де } \zeta = \frac{x/r_0}{Pe}, \quad Pe = \frac{u_m d}{\alpha_{eff}};$$

x – довжина труби;

r_0 – радіус труби.

Таким чином, останнім часом було вивчено, проаналізовано та узагальнено значний обсяг сучасних теоретичних та розрахункових засобів розрахунку характеристик теплообмінних апаратів, працюючих на нанофлюїдах. Крім того, калориметричний стенд для експериментальних досліджень малих холодильних машин [6] було суттєво вдосконалено з забезпеченням високої плавності регулювання робочих параметрів випробуваної холодильної машини та підвищенням точності засобів вимірювання показників її елементів.

Тому виникла задача провести розрахунково-експериментальне дослідження рооботи конденсатора типу «труба в трубі» у складі малої холодильної машини, працюючої на нанофлюїді, з урахуванням нових теоретичних положень та використанням модернізованого калориметричного стенду.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розрахунок і експериментальне дослідження теплообмінних характеристик конденсатора типу «труба в трубі», який працює у складі малої холодильної машини як на чистому ізобутані, так і на ізобутані з нанодомішками.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести на базі узагальнення сучасних теоретичних досліджень розрахунок теплообмінних характеристик конденсатора типу «труба в трубі», який працює у складі малої холодильної машини на ізобутані як без нанодомішок, так і з нанодомішками.

2. Виконати на вдосконаленому калориметричному стенді експериментальне дослідження конденсатору типу «труба в трубі», який працює у складі малої холодильної машини в тих же умовах.

3. Провести обробку і аналіз результатів теоретичного та експериментального досліджень конденсатора малої холодильної машини типу «труба в трубі» для визначення його теплотехнічних показників та перспектив використання у складі холодильних машин, які працюють на нанофлюїдах.

Основний зміст досліджень

Для проведення дослідження було взято конденсатор з водяним охолодженням малої холодильної машини, що працює на ізобутані. Конденсатор є мідною трубкою діаметром 10 мм, розміщеною в іншій трубі, по якій протікає вода, яка відбирає теплоту, що виділяється при конденсації холодоагенту в трубі меншого діаметра. Розрахунки і випробування проводилися при режимах роботи холодильної машини з температурами кипіння -20 , -10 , -5 , 0 °C і температурою конденсації 40 °C. Під час розрахунків приймалося, що течія охолоджуючої води – ламінарна. В якості нанодобавок до холодоагенту були використані наночастинки оксиду титану TiO_2 .

Для проведення експерименту було вибрано мастило Reniso ONF46 з додаванням 2,54 % наночастинок TiO_2 . Для руйнування кластерів наночастинок зразок суміші гомогенізували з використанням ультразвукового диспергатора при кімнатній температурі протягом 30 хвилин. Для видалення осаду кластерів наночастинок зразок центрифугували протягом 45 хвилин.

3 компресора, призначеного для випробувань, була видалена заводська заправка мастила в кількості 350 мл і замінена на чисте мастило Reniso ONF46. Після цього були проведені експериментальні роботи по визначенню параметрів холодильної установки і її елементів в різних режимах роботи. Після завершення експериментів чисте мастило було видалено з системи і замінено наномастилом з масовою концентрацією часток TiO_2 2,54 %, після чого досліди з визначення робочих параметрів об'єкта випробувань були повторені. При цьому враховувалося, що теплове навантаження конденсатора

$$Q_{\text{кл}} = G_{\text{вд}} c_{\text{вд}} (t_{\text{вд}2} - t_{\text{вд}1}),$$

де $G_{\text{вд}}$ – витрата води;

$c_{\text{вд}}$ – теплоємність води;

$t_{\text{вд}1}$, $t_{\text{вд}2}$ – температура води до і після конденсатора.

Результати досліджень

Експериментальне дослідження проводилося на вдосконаленому калориметричному стенді, схема якого наведена в роботі [6].

В ході проведення розрахунків та експерименту в конденсаторі, який працює у складі холодильної машини на ізобутані з наночастинами, було зафіксовано зниження різниці температур між холодоагентом та охолоджуючою водою в порівнянні з роботою холодильної машини на чистому холодоагенті при всіх режимах її роботи. Це дало підставу зробити висновок про позитивний вплив нанодобавок на теплообмінні характеристики апарату.

На рис. 1 показані температура конденсації і середня логарифмічна температура води, що охолоджує конденсатор. При відомих значеннях переданої теплоти через конденсатор Q (визначено по тепловому балансу конденсатора), відомій площі поверхні теплообмінного апарату F і відомому температурному напорі Δt з основного рівняння теплопередачі $Q = kF\Delta t$ можна визначити значення коефіцієнта теплопередачі k .

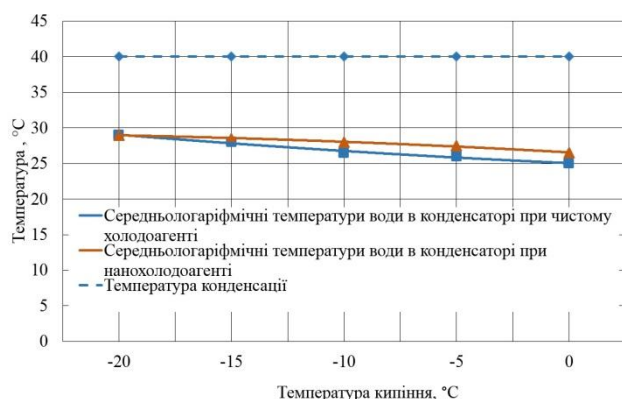


Рисунок 1 – Температури в конденсаторі

На рис. 2 представлені значення коефіцієнта теплопередачі в конденсаторі, визначені за допомогою розрахунку і експериментально. У переважній більшості випадків спостерігається збільшення коефіцієнта теплопередачі при використанні нанохолодоагента.

В ході експерименту було встановлено, що різниці температур води на вході і виході в конденсаторі були меншими при використанні холодоагенту з добавкою наночастинок. При рівних теплових навантаженнях та незмінних конструктивних параметрах конденсатора з цього можна зробити висновок, що при застосуванні нанохолодоагенту відбувається підвищення коефіцієнта теплопередачі. Це забезпечує передачу більшої кількості теплоти через ту ж теплообмінну поверхню.

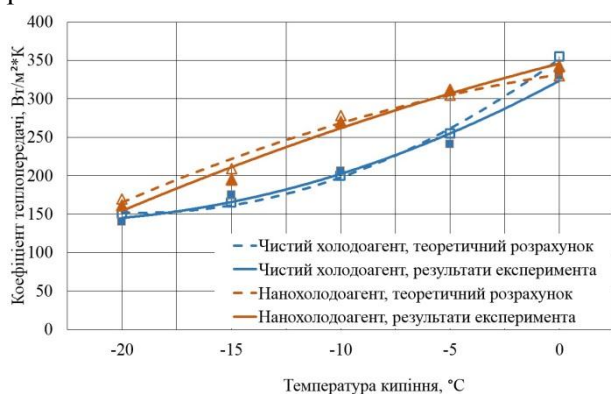


Рисунок 2 – Коефіцієнти теплопередачі в конденсаторі

Відхилення результатів експерименту від теоретичного розрахунку згідно зі співвідношеннями (1)-(7) не перевищує 5 %, що показує достатню точність розрахунку коефіцієнта теплопередачі k

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)^{-1},$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі з боку холодоагенту;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі з боку води;

d_1 – діаметр внутрішньої стінки труби;

d_2 – діаметр зовнішньої стінки труби.

З рівняння теплопередачі через стінку можна вивести коефіцієнт тепловіддачі з боку холодоагенту. Кількість переданого тепла і коефіцієнт тепловіддачі з боку води відомі. Термічний опір стінки труби не змінювався. Результати розрахунку коефіцієнта тепловіддачі з боку холодоагенту представлені на рис. 3.

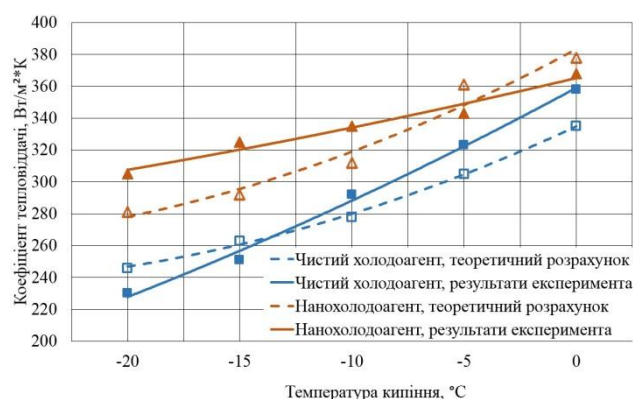


Рисунок 3 – Коефіцієнти тепловіддачі в конденсаторі

У табл. 1 представлені зміни у відсотках коефіцієнта тепловіддачі з боку холодоагенту і коефіцієнта теплопередачі в трубі конденсатора при холодоагенті з нанодомішками відносно його роботи на чистому холодоагенті. Підвищення коефіцієнта тепловіддачі відбувається у всіх режимах, крім режимів з високою температурою кипіння. З цього можна зробити висновок, що застосування добавок наночастинок може підвищити теплообмінні характеристики апаратів холодильних машин, не вимагаючи при цьому конструкційних змін елементів холодильної машини.

Аналіз результатів досліджень

Таким чином, використання нанофлюїдів дозволяє істотно покращити характеристики теплообмінних апаратів малої холодильної машини, зменшити температурні перепади на їх

поверхнях і, в результаті, знизити відношення тисків конденсації і кипіння, а отже і споживану холодильною машиною електричну потужність.

Таблиця 1 – Зміна коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі в конденсаторі при переводі холодильної машини на нанохолодоагент

Параметр	Температура кипіння, °C			
	-20	-10	-5	0
Зміна коефіцієнта тепловіддачі, %	24,8	12,9	7,2	-5,6
Зміна коефіцієнта теплопередачі, %	16,1	8	4,5	-3,5

Дисперсія наночастинок в рідині призводить до підвищеної в'язкості, на що впливає середній діаметр частинок, їх концентрація і температура. Підвищена в'язкість зменшує число Рейнольдса в порівнянні з базовою рідиною при тій же швидкості. Ці фактори повинні бути враховані при оцінці теплообмінних показників апаратів малої холодильної машини і можливостей застосовності нанофлюїдів в якості холодоагенту.

Застосування нанодобавок виглядає перспективним в домашніх холодильниках, торговому і іншому холодильному обладнанні з ціллю підвищення його енергетичних показників. Однак, ця проблема вимагає подальшого вивчення, аналізу, і досліджень.

Використання таких наночастинок, як фулерени або вуглецеві нанотрубки, здатне ще більше підвищити теплофізичні характеристики холодоагентів, а також знизити потужність тертя в компресорі, в порівнянні з наночастинами оксиду титану, які розглянуто в даній роботі.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Теоретично-експериментальне дослідження конденсатора малої холодильної машини типу «труба в трубі» показало, що застосування нанохолодоагенту як робочого тіла холодильної машини дозволяє підвищити теплообмінні характеристики апаратів холодильної машини без їх конструктивної зміни.

2. Використання холодоагенту з масовою концентрацією нанодобавок TiO_2 2,54 % дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі з боку холодоагенту на 7-25 %, а коефіцієнт теплопередачі в конденсаторі на 4,5-16 %.

3. Розбіжність результатів теоретичного і експериментального досліджень становить не

більше 5 %, що свідчить про достовірність результатів досліджень, а також перспективи подальшого проведення таких робіт.

4. Дослідження показало високу перспективність застосування в малих холодильних машинах конденсаторів типу «труба в трубі» і можливості суттєвого підвищення їх теплообмінних характеристик шляхом застосування нанофлюїдів в якості холодоагенту малої холодильної машини.

5. Що стосується холодильних машин середньої і великої холодопродуктивності, то застосування в них нанофлюїдів в якості холодоагента теж може виявитись доцільним. Але така доцільність потребує значних по обсягу і собівартості експериментальних перевірок, які можна планувати лише після повного закінчення відповідних робіт по малим холодильним машинам.

Список використаних джерел

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles [Electronic resource]. Conference: 1995 *International mechanical engineering congress and exhibition*, San Francisco, CA (United States), pp. 12-17 Nov. 1995. URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/196525>.
2. Strandberg R., Das D. K. Finned Tube Performance Evaluation with Nanofluids and Conventional Heat Transfer Fluids. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 49, № 3. pp. 580-588. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.08.008.
3. Xuan Y., Li Q. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*. 2003. Vol. 125, № 1. pp. 151-155. DOI: 10.1115/1.1532008.
4. Saidur R., Leong K. Y., Mohammad H. A. A Review on Applications and Challenges of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 3. pp. 1646-1668. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.
5. Балашов Д.О., Мілованов В.І. Вплив включень наночастинок до робочого тіла холодильної машини на якість її роботи. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2019. Вип. 1(14). С. 27-33. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2019-1-14-27-32>.
6. Milowanov V., Balashov D. Improvement of Thermotechnical Properties of Refrigerator's Evaporator Using Nanoparticles. *Technology audit and production reserves*. Vol. 2 No. 1(46) (2019): Industrial and Technology Systems. pp. 9-14.

7. Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1962. Vol. 1, № 3. P. 187-191. DOI: 10.1021/i160003a005.

8. Xuan Y., Roetzel W. Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43, # 19. pp. 3701-3707. DOI: 10.1016/s0017-9310(99)00369-5.

9. Brinkman H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *The Journal of Chemical Physics*. 1952. Vol. 20, № 4. pp. 571-581. DOI: 10.1063/1.1700493.

10. Drew D. A., Passman S. L. Theory of Multicomponent Fluids. *Applied Mathematical Sciences*. New York : Springer, 1999. 310 p.

11. Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000. Vol. 21, № 1. pp. 58-64. DOI: 10.1016/s0142-727x(99)00067-3.

12. Kakac S., Yener Y. Convective Heat Transfer. Ed. 3. CRC Press, 2013. 622 p.

References

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles [Electronic resource]. Conference: 1995 *International mechanical engineering congress and exhibition*, San Francisco, CA (United States), pp. 12-17 Nov. 1995. URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/196525>

2. Strandberg R., Das D. K. Finned Tube Performance Evaluation with Nanofluids and Conventional Heat Transfer Fluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010. Vol. 49, № 3. pp. 580-588. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.08.008.

3. Xuan Y., Li Q. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*. 2003. Vol. 125, № 1. pp. 151-155. DOI: 10.1115/1.1532008.

4. Saidur R., Leong K. Y., Mohammad H. A. A Review on Applications and Challenges of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 3. pp. 1646-1668. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.

5. Balashov D. O., Milovanov V. I. Vplyv vkliuchen nanochastok do robochoho tila kholodylnoi mashyny na yakist yii roboty. *Zbìrnik naukovih prac' Odes'koï deržavnoï akademii tehničnogo reguluvannâ ta âkosti*. 2019. Вип. 1 14). С. 27-33. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2019-1-14-27-32>.

6. Milovanov V., Balashov D. Improvement of Thermotechnical Properties of Refrigerator's Evaporator Using Nanoparticles. *Technology audit and production reserves*. Vol. 2 No. 1(46) (2019): Industrial and Technology Systems. pp. 9-14.

7. Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1962. Vol. 1, № 3. P. 187-191. DOI: 10.1021/i160003a005.

8. Xuan Y., Roetzel W. Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43, # 19. pp. 3701-3707. DOI: 10.1016/s0017-9310(99)00369-5.

9. Brinkman H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *The Journal of Chemical Physics*. 1952. Vol. 20, № 4. pp. 571-581. DOI: 10.1063/1.1700493.

10. Drew D. A., Passman S. L. Theory of Multicomponent Fluids. *Applied Mathematical Sciences*. New York : Springer, 1999. 310 p.

11. Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000. Vol. 21, № 1. pp. 58-64. DOI: 10.1016/s0142-727x(99)00067-3.

12. Kakac S., Yener Y. Convective Heat Transfer. Ed. 3. CRC Press, 2013. 622 p.

Надійшла до редакції 06.09.2021

УДК 536.423.4

В. В. Горін¹, д.т.н., **Л. В. Коломієць¹**, д.т.н., **В. В. Середа²** к.т.н.¹Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС ПЛІВКОВОЇ КОНДЕНСАЦІЇ У СЕРЕДИНІ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБ

У праці наведено короткий опис відомих теоретичних, напівемпіричних та експериментальних моделей (кореляцій) щодо розрахунку тепловіддачі під час конденсації робочих речовин у середині гладких горизонтальних труб. Проведено розрахунки теплообміну під час конденсації фторвуглеводних і імерсійних холодоагентів, вуглеводних та водяної пари у середині горизонтальних труб у разі проміжного та кільцевого режимів течії фаз за різними моделями (кореляціями). Представлено зіставлення розрахунків теплообміну за різними моделями з експериментальними даними різних авторів за багатьма робочими речовинами. Виявлено моделі, які демонструють найкраще узгодження дослідів із розрахунком серед усіх кореляцій. Надано рекомендації щодо застосування моделей для інженерної практики.

Ключові слова: теплообмін, конденсація, холодоагент, модель, горизонтальна труба.

В. В. Горин, д.т.н., Л. В. Коломиец, д.т.н., В. В. Середа, к.т.н.

МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ВНУТРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

В работе приведено краткое описание известных теоретических, полуэмпирических и экспериментальных моделей (корреляций) для расчета теплоотдачи при конденсации рабочих веществ внутри гладких горизонтальных труб. Проведены расчеты теплообмена при конденсации фторуглеводных и иммерсионных хладагентов, углеводных и водяного пара внутри горизонтальных труб в случае промежуточного и кольцевого режимов течения фаз по разным моделям (корреляциям). Представлено сопоставление расчетов теплообмена по разным моделям с экспериментальными данными разных авторов по многим рабочим веществам. Выявлены модели, которые демонстрируют наилучшее согласование опытов с расчетом среди всех корреляций. Даны рекомендации по применению моделей для инженерной практики.

Ключевые слова: теплообмен, конденсація, хладагент, модель, горизонтальная труба.

V. V. Gorin, DSc, L. V. Kolomiets, DSc, V. V. Sereda, PhD

MODELS FOR HEAT TRANSFER CALCULATION DURING FILM CONDENSATION INSIDE HORIZONTAL TUBES

The study of heat transfer during condensation in the middle of the pipes is relevant due to the constant need to improve the design of various heat exchangers (condensers of refrigeration and air conditioning systems, reactor safety systems, and power plant heaters). It is important to know the exact values of heat transfer coefficients in the case of condensation when their value is close to the heat transfer from the cooling side. Well-known theoretical, semi-empirical and experimental models and correlations for heat transfer calculation during condensation of working fluids inside smooth horizontal pipes have been described in the article. Selected models are widely used in various scientific publications for heat transfer prediction and construction of various heat exchangers with in-tube condensation. All correlations allow determining the average by tube perimeter, but local by the length of the tube, heat transfer coefficients in the case of annular and intermediate regimes of two-phase flow. All used dependences take into account current modes of phase flow. For choosing the best correlations, a comparison between selected models and experimental values of heat transfer coefficients obtained by different authors for condensation of ten working fluids inside smooth horizontal tubes with internal diameters more than 3 mm have been performed. Experimental values

were selected from well-known works, in which heat transfer was studied during condensation of such fluids as fluorocarbons, immersion refrigerants, hydrocarbons and steam in the case of intermediate and annular phase flows with a detailed description of research conditions (geometrical parameters of investigated tubes and regimes parameters of condensation process, such as heat flux, mass velocity, vapour quality, and condensation temperature). Comparison of various models with experimental data of different authors allowed identifying the models that show the best convergence with experiments among all correlations. Recommendations (range of application) for use of models in engineering practice are given.

Keywords: heat transfer, condensation, film, model, horizontal tube.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-31-40

Вступ

Інтерес до дослідження теплообміну під час конденсації у середині труб є актуальним унаслідок постійної необхідності покращення конструкцій різних теплообмінних апаратів (конденсаторів холодильних установок та систем кондиціювання повітря, систем безпеки реакторів, нагрівачів силових установок). При цьому важливо знати точні значення коефіцієнтів тепловіддачі у разі конденсації, коли їх величина близька до тепловіддачі з боку охолодження.

На даний час було опубліковано багато досліджень стосовно конденсації у середині гладких труб та каналів. Огляд більшості таких досліджень представлений у працях [1-7]. У всіх оглядах автори наводять перелік багатьох робіт із їх коротким описом і результатами цитованих досліджень. У більшості оглядів автори порівнюють свої власні результати з результатами різних теоретичних та емпіричних методів розрахунку без обґрунтування їх вибору. Слід додати, що автори робіт [5-7] відзначили різний ступінь збіжності у результатах розрахунку тепловіддачі для тих самих залежностей у різних авторів.

Отже, незважаючи на велику кількість наявних наукових праць, присвячених дослідженню плівкової конденсації у середині горизонтальних труб, існує велика потреба у новій інформації щодо зазначених процесів.

У запропонованій статті проведено порівняльний розрахунок тепловіддачі за наявними розрахунковими моделями з результатами експериментальних досліджень різних авторів під час конденсації робочих речовин у середині гладких горизонтальних труб.

Об'єкт дослідження

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну під час конденсації робочих речовин у середині гладких горизонтальних труб.

Аналіз літературних даних. Моделі розрахунку теплообміну

У цьому дослідженні розглядаються відомі теоретичні, напівемпіричні та експериментальні моделі та методи щодо розрахунку теплообміну під час конденсації різних робочих речовин у

середині горизонтальних труб, а саме кореляції з праць [8-16]. Вибір таких моделей зумовлений тим, що вони широко використовуються у різних дослідженнях під час розрахунку теплообміну, а також надають змогу визначати середні за периметром труби, але локальні за її довжиною, коефіцієнти тепловіддачі у разі кільцевого і проміжного режимів течії.

У праці [8] запропоновано модель розрахунку теплообміну щодо визначення середнього коефіцієнту тепловіддачі під час конденсації у середині труб для трьох режимів течії фаз (кільцевий, стратифікований і проміжний) за кореляцією:

$$\overline{Nu} = (Nu_f^n + Nu_b^n)^{1/n}, \quad (1)$$

де Nu_f – тепловіддача у області суттєвого впливу швидкості пари:

$$Nu = 0,0125 \left(Re \sqrt{\frac{\rho}{\rho_v}} \right) \left(\frac{x}{1-x} \right)^{Pr}, \quad (2)$$

де Nu_b – тепловіддача у області переважного впливу сили тяжіння:

$$Nu_b = 0,725 \left(\frac{Ga Pr_l}{Ja_l} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{\left(1 + 0,003 \sqrt{Pr_l} C^{3,1 - \frac{0,5}{Pr_l}} \right)^{0,3}}{(1 + DB)^{\frac{1}{4}}}, \quad (3)$$

$$C = \frac{0,47 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_v}} \left(\frac{Ja_l}{Pr_l} \right)^{\frac{1}{2}} \left(Re_l \frac{x}{1-x} \right)^{0,9}}{\left(\frac{Ga Pr_l}{Ja_l} \right)^{\frac{1,1}{4}}}, \quad (4)$$

$$B = \frac{1,55 \left[1 + 1,6 \cdot 10^{11} \left(\frac{Ja_l}{Pr_l} \right)^5 \right]^{\frac{1}{4}} \left[\left(\frac{Ga Pr_l}{Ja_l} \right) \right]^{1,8}}{\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_v}} \left[\frac{\overline{W}_l x}{1-x} \right]}, \quad (5)$$

$$D = 40 e^{-2,6 \cdot 10^{-4} \frac{\overline{W}}{(1-x)}}, \quad (6)$$

$$\overline{W} = \frac{W}{d\mu_l}, \quad \overline{W}_l = \frac{W(1-x)}{d\mu_l}. \quad (7)$$

У роботі [9] наводиться модель для розрахунку теплообміну під час конденсації, яка заснована на спрощеній структурі режимів течії фаз (кільцевий, проміжний та дисперсний):

$$\alpha_c = 0,003 \text{Re}_l^{0,74} \text{Pr}_l^{0,5} f_i, \quad (8)$$

де

$$\text{Re}_l = \frac{4G(1-x)\delta}{(1-\varepsilon)\mu_l}, \quad (9)$$

де G – масова швидкість;

$\delta = 0,25 \cdot d(1-\varepsilon)$ – товщина плівки конденса-

ту;

ε – об'ємний паровміст:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_h - \varepsilon_{ra}}{\ln\left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{ra}}\right)}. \quad (10)$$

У формулі (10) ε_h розраховується залежністю з праці [17], а ε_{ra} за залежністю з [18].

Множник f_i у (13) визначається наступним чином:

$$f_i = 1 + \frac{w_v}{w_l} \left[\frac{(\rho_l - \rho_v) g \delta^2}{\sigma} \right]^{1/4}, \quad (11)$$

де $u_v = Gx/\rho_v \varepsilon$ – середня швидкість пари;

$u_l = G(1-x)/[\rho_v(1-\varepsilon)]$ – середня швидкість рі-

дини.

У роботі [10] порівнюються розрахунки за моделями різних авторів із власною моделлю, де використовуються відомі формули для кільцевого режиму з визначенням меж застосування цих формул за власною новою картою режимів. Для побудови карти автори вводять новий критерій, який вони назвали «time fraction» F . Власне кореляція щодо розрахунку теплообміну має вигляд:

$$\alpha_{total} = F_{int+liq} \alpha_{int+liq} + F_{strat} \alpha_{strat} + F_{ann} \alpha_{ann}, \quad (12)$$

де

$$F_{int+liq} = (1-x)^i; \quad (13)$$

$$F_{strat} = \left(1 - x^{(s/\sqrt{x})}\right) - (1-x)^i; \quad (14)$$

$$F_{ann} = 1 - F_{int+liq} - F_{strat}, \quad (15)$$

де

$$i = 0,0243Xi + 8,07; \quad (16)$$

$$Xi = (We_{vo}^{0,4}) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right), \quad (17)$$

де

$$We_{vo} = \left(\frac{G^2 d_{in}}{\rho_v \sigma} \right), \quad (18)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу;

$$s = \frac{1}{0,45Xs} + \frac{1}{0,025Xs^{4,44}}; \quad (19)$$

$$Xs = (Fr_{vo}^{0,5}) \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,65}; \quad (20)$$

$$Fr_{vo} = \left(\frac{G^2}{\rho_v^2 g d_{in}} \right). \quad (21)$$

Для переривчастого режиму течії рідини потоку у праці використовується модифіковане співвідношення з праці [19]:

$$\alpha_{int+liq} = 0,023 \left(\frac{G d_{in}}{\mu_l} \right) \text{Pr}^{0,3} \left(\frac{\lambda_l}{d_{in}} \right), \quad (22)$$

де $\text{Pr}_l = \mu_l c_{pl} / \lambda_l$.

У разі стратифікованого режиму використовується залежність з роботи [20]:

$$\alpha_{strat} = 0,555 \left(\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g r d_{in}^3}{\lambda_l \mu_l \Delta T} \right). \quad (23)$$

Під час кільцевого режиму течії потоку використовується кореляція з праці [21]:

$$\alpha_{ann} = 0,023 \text{Re}_l^{0,8} \text{Pr}_l^{0,4} \left(1 + \frac{2,22}{X_{tt}^{0,889}} \right) \left(\frac{\lambda_l}{d_{in}} \right), \quad (24)$$

де $\text{Re}_l = G d_{in} (1-x) / \mu_l$.

Ще одна модель розрахунку теплообміну представлена у роботі [11]. Для визначення меж режимів авторами використовуються безрозмірна швидкість пари $J_g = xG/[gd\rho_v(\rho_l - \rho_v)]^{1/2}$ і параметр Мартінееллі X_{tt} . У відповідності до цього пропонується наступна модель розрахунку.

Для області стратифікованого режиму течії фаз тепловіддача залежить від Δt ($J_g \leq J_g^T$):

$$\alpha_D = \left[\alpha_A (J_g^T / J_g)^{0,8} - \alpha_{STRAT} \right] (J_g / J_g^T) + \alpha_{STRAT}, \quad (25)$$

де

$$\alpha_{STRAT} = 0,725 \left[1 + 0,741 \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,3321} \right]^{-1} \left[\frac{\lambda_l^3 \rho_l (\rho_l - \rho_v) r g}{\mu_l d \Delta T} \right]^{-0,25} + (1-x^{0,087}) \alpha_{LO}, \quad (26)$$

$$\alpha_{LO} = 0,023 \text{Re}_{lo}^{0,8} \text{Pr}_l^{0,4} \lambda_l / d. \quad (27)$$

Для області кільцевого режиму течії фаз тепловіддача не залежить від Δt ($J_g > J_g^T$):

$$\alpha_A = \alpha_{LO} \left[1 + 1,128 x^{0,8170} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,3685} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0,2363} \left(1 - \frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{2,144} \text{Pr}_l^{-0,1} \right]. \quad (28)$$

Параметр J_g^T записується у вигляді:

$$J_g^T = \left\{ \left[7,5 / (4,3 \cdot X_{tt}^{1,111} + 1) \right]^{-3} + C_T^{-3} \right\}^{-1/3}, \quad (29)$$

де стала C для вуглеводних та холодоагентів дорівнює 1,6 та 2,6 відповідно.

Авторами праці [12] представлена напівемпірична кореляція, у якій розглядається гомогенна модель течії фаз під час конденсації у трубах, а течія суміші пари та конденсату приймається турбулентною. Автори обмежують застосування своєї моделі $Re_l = G d_{in} / \mu_l > 5 \cdot 10^3$. Приймаючи аналогію Рейнольдса автори [12] вважають, що теплообмін під час конденсації суміші є аналогічним до конвективного теплообміну у разі турбулентної течії рідини в трубі, а саме:

$$Nu = \alpha d_{in} / \lambda_l \sim Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (30)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

d_{in} – внутрішній діаметр труби;

λ_l – коефіцієнт теплопровідності;

Nu , Re , Pr – критерії Нусельта, Рейнольдса та Прандтля.

Двофазність потоку урахується у залежності щодо розрахунку локальної тепловіддачі шляхом введення відповідного комплексу $[1 + x(\rho_l / \rho_v - 1)]^{0,5}$ до залежності (30):

$$Nu = c Re_l^{0,8} Pr_l^{0,43} \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right) \right]^{0,5}, \quad (31)$$

де C – стала, $C = 0,024$.

У працях [13-15] автор наводить модель розрахунку локальної тепловіддачі, у якій застосовується залежність для однофазної конвекції α_c у разі турбулентної течії рідини у середині труби:

$$\alpha_{TP} = \alpha_I + \alpha_{Nu}, \quad (32)$$

$$\alpha_I = \alpha_c \left(\frac{\mu_l}{14\mu_v} \right) \left[(1-x)^{0,8} + \frac{3,8x^{0,76} (1-x)^{0,04}}{p^{0,38}} \right], \quad (33)$$

де

$$\alpha_c = 0,023 Re_l^{0,8} Pr_l^{0,43} \left(\frac{\lambda_l}{d_{in}} \right), \quad (34)$$

$$n = 0,0058 + 0,557 p_r, \quad (35)$$

$p_r = P/P_c$ – приведений тиск (відношення тиску при заданій температурі P до критичного тиску P_c);

$$\alpha_{Nu} = 1,32 Re_l^{-1/3} [\rho_l (\rho_l - \rho_v) g \lambda_l^3 / \mu_l^2]^{1/3}, \quad (36)$$

де

$$Re_l = \frac{G(1-x)d}{\mu_l}. \quad (37)$$

У теоретичній праці [16] запропоновано кореляцію щодо визначення локального числа Нусельта Nu у безрозмірному вигляді:

$$\frac{Nu F_2}{Pr_l Re_l^{0,9}} = 0,15 \left(\frac{1}{X_{tt}} + \frac{2,85}{X_{tt}^{0,476}} \right), \quad (38)$$

де

X_{tt} – параметр Мартинеллі:

$$X_{tt} = (\mu_l / \mu_v)^{0,1} (\rho_v / \rho_l)^{0,5} [(1-x)/x]^{0,9}, \quad (39)$$

де μ_l і μ_v – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини та пари відповідно;

ρ_l і ρ_v – густина для рідини та пари відповідно;

x – масовий паровміст.

Комплекс F_2 у формулі (38) для ламінарного, буферного та турбулентного шарів відповідно обчислюється за:

$$F_2 = 0,707 Pr_l Re_l^{0,5}, \quad y^+ < 5; \quad (40)$$

$$F_2 = 5 Pr_l + 5 \ln[1 + Pr_l (0,09636 Re_l^{0,585} - 1)], \quad 5 < y^+ < 30; \quad (41)$$

$$F_2 = 5 Pr_l + 5 \ln(1 + 5 Pr_l) + 2,5 (0,00313 Re_l^{0,812}), \quad y^+ > 30. \quad (42)$$

У залежностях (40) – (42), для різних значень числа Pr_l (2,5-4,5), безрозмірна відстань від внутрішньої стінки труби y^+ виражається як:

$$y^+ = \frac{y u^*}{\nu_l}, \quad (43)$$

де ν_l – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини;

$u^+ = u / (\tau_f / \rho_l)^{0,5}$ – безрозмірна швидкість

турбулентного потоку:

u – швидкість плівки конденсату;

τ_f – напруження на межі поділу фаз.

Мета і завдання дослідження

Метою праці є порівняння розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі за відомими кореляціями з результатами експериментальних досліджень під час плівкової конденсації пари, вуглеводних та холодоагентів у середині горизонтальних труб з

ціллю визначення найбільш коректних рішень, які дозволяють найкраще оцінити теплообмін.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести, на підставі наявних експериментальних даних із робіт різних авторів, розрахунки коефіцієнтів тепловіддачі за відомими моделями (кореляціями) у разі конденсації робочих речовин у середині гладких горизонтальних труб.

2. За результатами отриманих обчислень, визначити моделі щодо розрахунку теплообміну, які найкраще описують результати експериментальних досліджень тепловіддачі під час конденсації робочих речовин у середині труб у разі проміжного та кільцевого режимів течії фаз.

Порівняння розрахунку теплообміну за існуючими моделями на основі результатів експериментів різних авторів

Для визначення кореляцій, які найкраще описують результати досліджень, нами проведено порівняння розрахунку теплообміну за моделями з робіт [8-16] на основі результатів експериментів різних авторів стосовно конденсації багатьох робочих речовин у середині звичайних гладких труб ($d_{in} > 3$ мм).

Для цього були обрані експериментальні дані у разі конденсації вуглеводних, імерсійних речовин, імерсійних і фторвуглеводних холодоагентів та пари з праць: [22] – R744 (діоксид вуглецю), [23] – гідрокарбони (R290 (пропан), R600a (ізобутан)), [24] – газофракціонуючий холодоагент R245fa (пентафторпропан), імерсійні речовини Novex649 і HFE-7000, [25] – імерсійний холодоагент FC-72, [26] – водяна пара R718, [27] – фторвуглеводні холодоагенти R32, R134a.

Слід зазначити, що для порівняння розрахунків за наведеними моделями використовувались тільки ті результати експериментальних досліджень, які відповідали кільцевому і проміжному режимів течії фаз у відповідності до розрахунків за формулами (24)-(29) із праці [11].

Так, у роботі [22] проводились дослідження конденсації R744 (діоксид вуглецю) у трубі з внутрішнім діаметром $d_{in} = 2,5$ мм і довжиною $l = 3,48$ м за масових швидкостей пари $G = 200 - 800$ кг/(м²·с) і температури конденсації $t_c = -15^\circ\text{C}$ та $t_c = -25^\circ\text{C}$. Порівняння результатів розрахунку тепловіддачі за наведеними моделями з дослідними даними з роботи [22] під час конденсації R744 наведено на рис. 1.

У роботі [23] проводились дослідження конденсації гідрокарбонів: R290 (пропан), R600a (ізобутан), R1270 (ізобутан) і DME (диметилетіл) у середині горизонтальної труби з внутрішнім діаметром $d_{in} = 8,8$ мм і довжиною $l = 0,53$ м при

$G = 100-300$ кг/(м²·с). Порівняння результатів розрахунку тепловіддачі за зазначеними моделями із дослідними даними у разі конденсації R290 і R600a з праці [23] наведено на рис. 2.

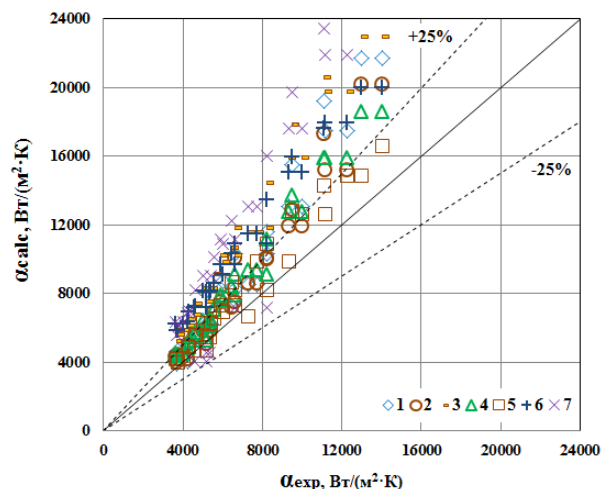


Рисунок 1 – Порівняння експериментальних даних [22] із розрахунком за моделями: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10], 4 – [11], 5 – [12], 6 – [13], 7 – [16]

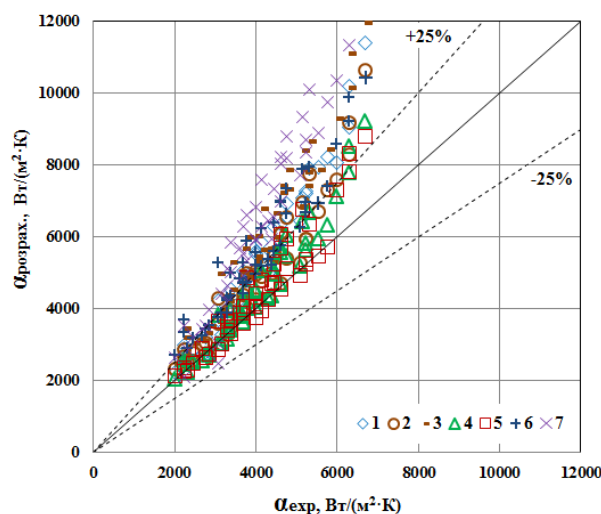


Рисунок 2 – Порівняння експериментальних даних [23] із розрахунком за моделями: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10], 4 – [11], 5 – [12], 6 – [13], 7 – [16]

У роботі [24] проводились дослідження конденсації газофракціонуючого холодоагенту R245fa (пентафторпропан), імерсійні речовини Novex649 і HFE-7000 у середині горизонтальної труби з внутрішнім діаметром $d_{in} = 7,75$ мм і довжиною $l = 0,33$ м у діапазоні масових швидкостей $G = 150-700$ кг/(м²·с) та масових паровмістів $x = 0,05-0,95$. Порівняння результатів розрахунку тепловіддачі за відповідними моделями із дослідними даними з праці [24] наведено на рис. 3.

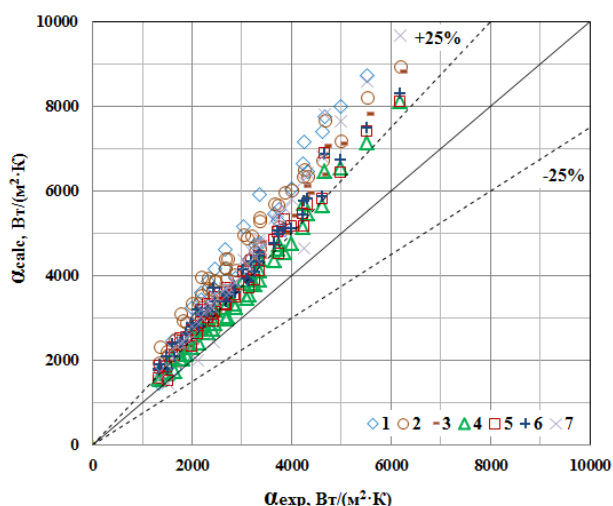


Рисунок 3 – Порівняння експериментальних даних [24] із розрахунком за моделями: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10], 4 – [11], 5 – [12], 6 – [13], 7 – [16]

У роботі [25] автори досліджували конденсацію імерсійного холодоагенту FC-72 у середині горизонтальній трубі з внутрішнім діаметром $d_{in} = 7,12$ мм і довжиною $l = 0,8$ м у діапазоні масових швидкостей $G = 143-402$ кг/(м²·с), густини теплового потоку $q = 30 - 72$ кВт/м², масових паровмістів $x = 0,45-0,95$ та температури конденсації $t_c = 62$ °С. Порівняння результатів розрахунку тепловіддачі за наведеними моделями із дослідними даними у разі конденсації FC-72 із праці [25] наведено на рис. 4.

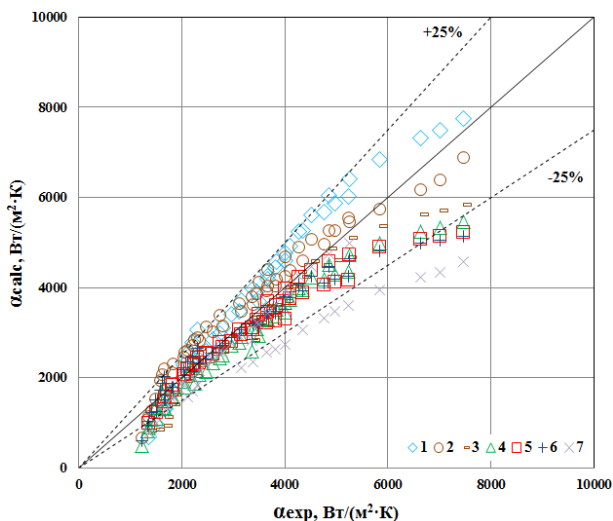


Рисунок 4 – Порівняння експериментальних даних [25] із розрахунком за моделями: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10], 4 – [11], 5 – [12], 6 – [13], 7 – [16]

Автор праці [26] проводив експериментальні дослідження теплообміну у разі повної і неповної конденсації насиченої водяної пари та пари із

пароводяної суміші у гладких горизонтальних трубах із нержавіючої сталі з внутрішніми діаметрами $d_{in} = 10, 13$ і 17 мм та довжиною $l = 2,5$ і 12 м за високих значень тиску. Досліди проводилися при значеннях тиску $p = 1,23, 2,45, 8,8$ МПа, густини теплового потоку $q = (0,162-1,57) \cdot 10^6$ Вт/м², масової швидкості $G = 93-2000$ кг/(м²·с), масовому паровмісті на вході $x_1 = 0,26-1,0$ і виході $x_2 = 0-0,69$ та густини теплового потоку $q = 162-1570$ кВт/м². Порівняння результатів розрахунку тепловіддачі за наведеними моделями із дослідними даними у разі конденсації чистої насиченої водяної пари із праці [26] наведено на рис. 5.

У праці [27] вимірювались локальні коефіцієнти тепловіддачі та втрати тиску під час конденсації холодоагентів R22, R32, R125, R134a, R410A і R236ea у горизонтальній трубі з внутрішнім діаметром $d_{in} = 8$ мм і довжиною $l = 1$ м у широкому діапазоні масових швидкостей $G = 65-750$ кг/(м²·с), густини теплового потоку $q = 6-62$ кВт/м² та масових паровмістів x .

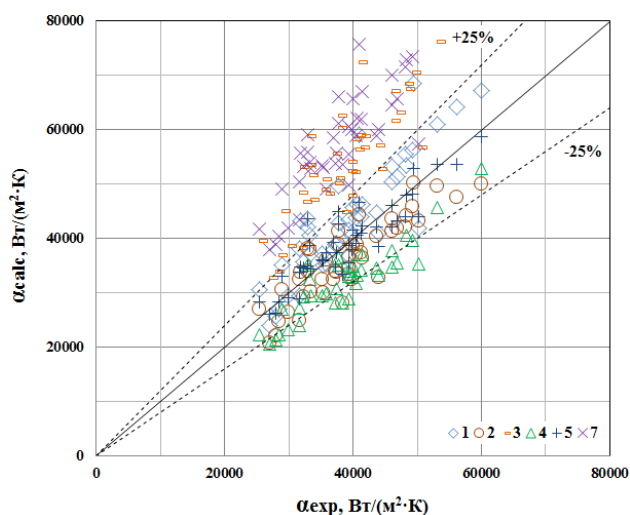


Рисунок 5 – Порівняння експериментальних даних [25] із розрахунком за моделями: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10], 4 – [11], 5 – [13], 6 – [16]

Порівняння результатів розрахунку тепловіддачі за наведеними моделями із дослідними даними у разі конденсації R134a і R32 із праці [27] наведено на рис. 6.

Верифікація моделей розрахунку теплообміну

Авторами статті проведено верифікацію представлених моделей розрахунку теплообміну.

У зведених табл. 1 представлено у відсотках кількість розрахункових точок n , які збігаються з результатами досліджень різних авторів у межах похибки ± 25 %.

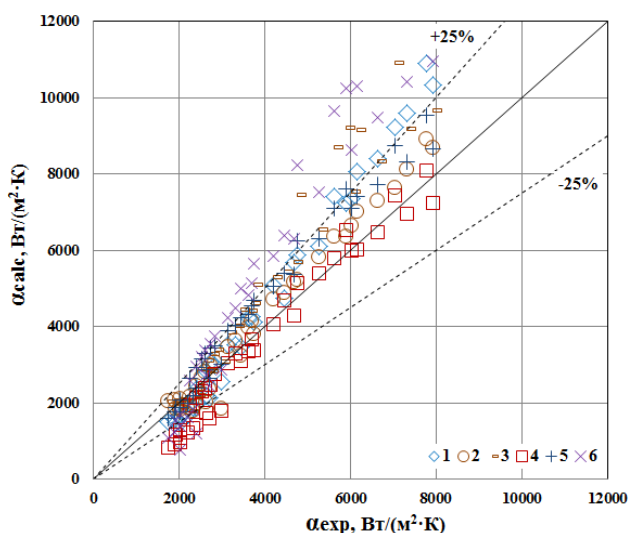


Рисунок 6 – Порівняння експериментальних даних [27] із розрахунком за моделями: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10], 4 – [12], 5 – [13], 6 – [16]

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунків тепловіддачі за різними моделями

Модель	Експериментальні дані (n, %)					
	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[27]
[8]	50	32	16	86	78	58
[9]	69	62	2	84	89	92
[10]	0	11	12	82	4	39
[11]	47	77	61	90	65	-
[12]	75	81	31	90	-	68
[13]	0	6	4	92	98	58
[16]	19	6	12	61	2	13

Розрахунками встановлено, що модель [16] незадовільно узагальнює результати наявних досліджень під час конденсації R744, R290, R600a, R245fa, Novex649, HFE-7000, FC-72, R32, R134a та пари у середині труб (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить 2-61 % від загальної кількості). Також незадовільно описує експериментальні дані модель [10] (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить 0-39 % від загальної кількості), за винятком холодоагенту FC-72 (82 %).

Кореляція з праці [8] не узагальнює експериментальні дані у разі конденсації R744, R290, R600a, R245fa, Novex649, HFE-7000, R32, R134a (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить 16-58 % від загальної кількості), окрім FC-72 (86 %) та пари (78 %).

Модель [13] не працює у разі обчислення дослідних даних під час конденсації R744, R290, R600a, R245fa, Novex649, HFE-7000, R32, R134a (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить 2-61 % від загальної кількості), за винятком FC-72 (92 %) та пари (98 %).

Напівемпірична кореляція з роботи [12] добре узагальнює результати досліджень під час конденсації R744, R290, R600a, FC-72 та пари (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить більш ніж 75 % від загальної кількості). Дещо гірше кореляція описує дані по конденсації R32, R134a (68 %) та не працює у випадку обчислення даних щодо R245fa, Novex649 та HFE-7000 (31 %).

Модель [9] добре узагальнює експериментальні дані у разі конденсації FC-72, пари, R32 та R134a (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить більш ніж 84 % від загальної кількості). Виявлено незадовільну відповідність моделі у разі розрахунку результатів експериментів під час конденсації R744 (69 %), R290 та R600a (62 %). Кореляції з [9] не працюють при обчисленні даних по конденсації R245fa, Novex649, HFE-7000 (2 %).

Модель [11] задовільно узагальнює експериментальні дані у разі конденсації FC-72, R290, R600a, R32 та R134a (кількість точок, які узгоджуються із точністю $\pm 25\%$ становить більш ніж 77 % від загальної кількості), але не дозволяє коректно узагальнити результати експериментів під час конденсації R744 (47 %), R245fa, Novex649, HFE-7000 (61 %) та пари (65 %).

Висновки

1. Проведено розрахунки теплообміну під час конденсації R744, R290, R600a, R245fa, Novex649, HFE-7000, FC-72, R32, R134a та водяної пари у середині горизонтальних труб у разі проміжного та кільцевого режимів течії фаз за різними моделями (кореляціями).

2. Надано зіставлення розрахунків теплообміну за різними моделями з експериментальними даними різних авторів за десятьма робочими речовинами. Найкраще узгодження дослідів із розрахунком серед усіх кореляцій продемонстрували моделі з праць [9] та [12].

3. Для інженерної практики може бути рекомендовано застосування моделі [12] для розрахунку тепловіддачі під час конденсації водяної пари, вуглеводних R744, R290, R600a та імерсійного холодоагенту FC-72, а також моделі [12] для розрахунку тепловіддачі при конденсації фторвуглеводних холодоагентів R32 і R134a. При цьому необхідно урахувати межі застосування граничних величин кореляцій.

4. Усі моделі, за винятком [16], показують досить точне узгодження розрахунків із усіма дослідними даними під час конденсації імерсійного холодоагенту FC-72 (похибка у межах

$\pm 25\%$).

5. У цілому спостерігається незадовільна відповідність усіх розрахункових моделей всім дослідним даним при конденсації перспективних речовин R245fa, Novec649, HFE-7000.

6. У подальших дослідженнях процесів конденсації у середині труб необхідно розширити діапазон перспективних робочих речовин, які використовуються у експериментах, зокрема багатокомпонентних холодоагентів та інших речовин.

Список використаних джерел

1. Doretti L., Zilio C., Mancin S., Cavallini A. Condensation Flow Patterns inside plain and Microfin Tubes: A Review. *International Journal of Refrigeration*. 2013. Vol. 36, № 2. pp. 567-587.
2. Dalkilic A., Aktas M., Acikgoz O., Wongwises S. A Review of Recent Empirical Correlations for the Calculation of Determination of R134a's Convective Heat Transfer Coefficient in Vertical Condensers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2015. № 69. pp. 41-50.
3. Huang J., Zhang J., Wang L. Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas. *Applied Thermal Engineering*. 2015. № 89. pp. 469-484.
4. Righetti G., Zilio C., Mancin S., Longo G. A review on in-tube two-phase heat transfer of hydrofluoro-olefines refrigerants. *Science and Technology for the Built Environment*. 2016. Vol. 22. № 8. pp. 1191-1225.
5. Ріферт В. Г., Горін В. В., Усенко В. І., Середа В. В. Конденсация внутри горизонтальных труб: состояние вопроса и анализ задачи исследования. *Промышленная теплотехника*. 2011. № 33 (8). С. 62-71.
6. Ріферт В. Г., Барабаш П. А., Горін В. В., Середа В. В. Теплообмен при конденсации внутри горизонтальных гладких труб. Совершенствование метода расчета теплообмена. *Холодильна техніка та технологія*. 2015. № 6 (51). С. 26-34.
7. Середа В. В., Горін В. В. Гідродинаміка та теплообмін під час конденсації пари робочих речовин у середині горизонтальних труб у разі стратифікованого режиму течії фаз. Розрахунок тепловіддачі. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2018. № 4. С. 48-56.
8. Fujii T. Enhancement to condensing heat transfer – new developments. *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 1995. № 2. pp. 127-137.
9. Thome J. R., Hajal J., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes. Part 2: New heat transfer model based on flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. № 18. pp. 3365-3387.
10. Jassim E. W., Newell T. A., Chato J. C. Prediction of two-phase condensation in horizontal tubes using probabilistic flow regime maps. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. № 3. pp. 485-496.
11. Cavallini A., Del Col D., Doretti L., Matkovic M., Rossetto L., Zilio C., Censi G. Condensation in Horizontal Smooth Tubes: A New Heat Transfer Model for Heat Exchanger Design. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. № 8. pp. 31-38.
12. Ananiev E. P., Boyko L. D., Kruzhilin G. N. Heat transfer in the presence of steam condensation in a horizontal tube. *Proceedings of the 2nd International Heat Transfer Conference*. August Colorado. Part 2. 1961. pp. 290-295.
13. Shah M. M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1979. Vol. 22. № 4. pp. 547-556.
14. Shah M. M. General correlation for heat transfer during condensation in plain tubes: Further development and verification. *ASHRAE Transactions*. 2013. Vol. 119. № 2. pp. 1-9.
15. Shah M. M. Prediction of Heat Transfer during Condensation in Non-Circular Channels. *Inventions*. Engineering Research Associates. 2019. pp. 1-22.
16. Traviss D. P., Baron A.B., Rohsenow W.M. Forced-convection condensation inside tubes. Report No. DSR-72591-74. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. MA. 1971. 105 p.
17. Zivi S. M. Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production. *Transactions of the ASME*. 1975. № 86. pp. 247-252.
18. Rouhani S. Z. Subcooled void fraction, Report No. AE-RTV841. AB Atomenergi Sweden, 1969. 138 p.
19. Dittus F. W., Boelter L. M. K. Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type. University of California Press. Berkeley. *University of California Publications in Engineering*. 1930. Vol. 2. 443-461.
20. Chato J. Laminar condensation inside horizontal and inclined tube. *ASHRAE Journal*. 1962. Vol. 4. № 2. pp. 52-60.
21. Dobson M., Chato J. Condensation in smooth horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer of ASME*. 1998. Vol. 120. № 1. pp. 193-213.
22. Kim Y. J., Jang J., Hrnjak P. S., Kim M. S. Condensation heat transfer of carbon dioxide inside horizontal smooth and microfin tubes at low temperature. *Journal of Heat Transfer of ASME*. 2009.

Vol. 131. № 2. pp. 1-10.

23. Park K. J., Jung D., Seo T. Flow condensation heat transfer characteristics of hydrocarbon refrigerants and dimethyl ether inside a horizontal plain tube. *Journal of Multiphase Flow*. 2008. Vol. 34. № 7. pp. 628-635.

24. Ghim G., Lee J. Condensation heat transfer of low GWP ORC working fluids in a horizontal smooth tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 104. pp. 718-728.

25. Lee H., Mudawar I., Hasan M. Flow condensation in horizontal tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. № 66. pp. 31-45.

26. Бойко Л. Д. Исследование теплоотдачи при конденсации пара внутри трубы. Теплообмен в элементах энергетических установок. Л.: Наука, 1966. С. 197-212.

27. Cavallini A., Censi G., Del Col D., Doretti L., Longo G. A., Rossetto L. Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*. 2001. Vol. 24. № 1. pp. 73-87.

References

1. Doretti L., Zilio C., Mancin S., Cavallini A. Condensation Flow Patterns inside plain and Micro-fin Tubes: A Review. *International Journal of Refrigeration*. 2013. Vol. 36, № 2. pp. 567-587.

2. Dalkilic A., Aktas M., Acikgoz O., Wongwises S. A Review of Recent Empirical Correlations for the Calculation of Determination of R134a's Convective Heat Transfer Coefficient in Vertical Condensers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2015. № 69. pp. 41-50.

3. Huang J., Zhang J., Wang L. Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas. *Applied Thermal Engineering*. 2015. № 89. pp. 469-484.

4. Righetti G., Zilio C., Mancin S., Longo G. A review on in-tube two-phase heat transfer of hydro-fluoro-olefines refrigerants. *Science and Technology for the Built Environment*. 2016. Vol. 22. № 8. pp. 1191-1225.

5. Rifert V., Gorin V., Usenko V., Sereda V. Condensation inside horizontal pipes: the state of the issue and analysis of the research problem. *Industrial heat engineering*. 2011. № 33 (8). pp. 62-71.

6. Rifert V., Barabash P., Gorin V., Sereda V. Heat transfer by condensation inside horizontal smooth pipes. Improving the method of calculating heat exchange. *Refrigeration equipment and technology*. 2015. № 6 (51). pp. 26-34.

7. Sereda V., Gorin V. Hydrodynamics and heat exchange during condensation of working steam in the middle of horizontal pipes in the case of stratified phase flow regime. Calculation of heat transfer. *Integrated technologies and energy saving*. 2018. № 4. pp. 48-56.

8. Fujii T. Enhancement to condensing heat transfer – new developments. *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 1995. № 2. pp. 127-137.

9. Thome J. R., Hajal J., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes. Part 2: New heat transfer model based on flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. № 18. pp. 3365-3387.

10. Jassim E. W., Newell T. A., Chato J. C. Prediction of two-phase condensation in horizontal tubes using probabilistic flow regime maps. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. № 3. pp. 485-496.

11. Cavallini A., Del Col D., Doretti L., Matkovic M., Rossetto L., Zilio C., Censi G. Condensation in Horizontal Smooth Tubes: A New Heat Transfer Model for Heat Exchanger Design. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. № 8. pp. 31-38.

12. Ananiev E. P., Boyko L. D., Kruzhilin G. N. Heat transfer in the presence of steam condensation in a horizontal tube. Proceedings of the 2nd International Heat Transfer Conference. August Colorado. Part 2. 1961. pp. 290-295.

13. Shah M. M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1979. Vol. 22. № 4. pp. 547-556.

14. Shah M. M. General correlation for heat transfer during condensation in plain tubes: Further development and verification. *ASHRAE Transactions*. 2013. Vol. 119. № 2. pp. 1-9.

15. Shah M. M. Prediction of Heat Transfer during Condensation in Non-Circular Channels. *Inventions*. Engineering Research Associates. 2019. pp. 1-22.

16. Traviss D. P., Baron A.B., Rohsenow W. M. Forced-convection condensation inside tubes. Report No. DSR-72591-74. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA. 1971. 105 p.

17. Zivi S. M. Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production. *Transactions of the ASME*. 1975. № 86. pp. 247-252.

18. Rouhani S. Z. Subcooled void fraction, Report No. AE-RTV841. AB Atomenergi Sweden, 1969. 138 p.

19. Dittus F. W., Boelter L. M. K. Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type. University of California Press. Berkeley. *University*

- of California Publications in Engineering. 1930. Vol. 2. 443-461.
20. Chato J. Laminar condensation inside horizontal and inclined tube. *ASHRAE Journal*. 1962. Vol. 4. № 2. pp. 52-60.
21. Dobson M., Chato J. Condensation in smooth horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer of ASME*. 1998. Vol. 120. № 1. pp. 193-213.
22. Kim Y. J., Jang J., Hrnjak P. S., Kim M. S. Condensation heat transfer of carbon dioxide inside horizontal smooth and microfin tubes at low temperature. *Journal of Heat Transfer of ASME*. 2009. Vol. 131. № 2. pp. 1-10.
23. Park K. J., Jung D., Seo T. Flow condensation heat transfer characteristics of hydrocarbon refrigerants and dimethyl ether inside a horizontal plain tube. *Journal of Multiphase Flow*. 2008. Vol. 34. № 7. pp. 628-635.
24. Ghim G., Lee J. Condensation heat transfer of low GWP ORC working fluids in a horizontal smooth tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 104. pp. 718-728.
25. Lee H., Mudawar I., Hasan M. Flow condensation in horizontal tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. № 66. pp. 31-45.
26. Boyko L. D. Heat transfer during vapor condensation inside tubes (in Russian). *Heat Transfer in the Elements of Power Plants*. 1966. pp. 197-212.
27. Cavallini A., Censi G., Del Col D., Doretto L., Longo G. A., Rossetto L. Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*. 2001. Vol. 24. № 1. pp. 73-87.

Надійшла до редакції 02.09.2021

РОЗДІЛ 3

Інформаційно-вимірювальні системи і технології

УДК 621.317

В. П. Квасніков, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. О. Катаєва, к.т.н.*Національний авіаційний університет, м. Київ*

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

У статті представлено спосіб побудови інформаційно-вимірювальної системи діагностики робочих характеристик електродвигунів. З метою передачі даних отриманих від вимірювальних датчиків до серверного додатку використовувався мікроконтролер ESP8266. Запропоновано спосіб візуалізації отриманих даних з використанням web-серверних технологій. Проведено тестування запропонованої системи з використанням електродвигуна постійного струму серії RS-775. Досліджено робочі характеристики прототипу приладу для вимірювання обертового моменту електродвигуна, який використовувався у запропонованій вимірювальній системі. Визначено його похибку шляхом розрахунку вибіркового стандартного відхилення від очікуваних результатів.

Ключові слова: вимірювання обертового моменту, електродвигун, засоби вимірювання, програмне забезпечення, мікроконтролер, обробка сигналу, протокол передачі даних, сервер.

В. П. Квасніков, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. А. Катаєва, к.т.н.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В статье представлен способ построения информационно-измерительной системы диагностики рабочих характеристик электродвигателей. В целях передачи данных полученных от измерительных датчиков к серверному приложению использовался микроконтроллер ESP8266. Предложен способ визуализации полученных данных с использованием Web-серверных технологий. Проведено тестирование предложенной системы с использованием электродвигателя постоянного тока серии RS-775. Исследованы рабочие характеристики прототипа прибора для измерения крутящего момента электродвигателя, который использовался в предложенной измерительной системе. Определена его погрешность путем расчета выборочного стандартного отклонения от ожидаемых результатов.

Ключевые слова: измерение крутящего момента, электродвигатель, средства измерения, программное обеспечение, микроконтроллер, обработка сигнала, протокол передачи данных, сервер.

V. P. Kvasnikov, DSc, D. M. Kvashuk, PhD, M. O. Kataieva, PhD

DEVELOPMENT OF INFORMATION-MEASURING DIAGNOSIS SYSTEM WORKING CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MOTORS

The article explores a method for constructing an information-measuring system for diagnosing the performance characteristics of electric motors. The structure of such systems, features of signal transmission and methods of its transformation, as well as software for visualization and data processing are considered. Algorithmic and software developments are highlighted that provide a full cycle of processing the information parliaments of electric motors, from the transformation of a physical quantity into a unified signal, to data visualization.

The structure of microcontrollers, which were used in the development of the measuring system, is investigated. In particular, the performance of the ESP8266 microcontroller, which was used to transfer data received from measuring sensors to a server application. The method of visualization of the obtained data using web-server technologies is highlighted. The proposed system was tested using a DC electric motor of the RS-775 series. The error of the measuring sensors used in the proposed system is determined by calculating the sample standard deviation from the expected results.

Particular attention is paid to the development of server software in terms of processing signal parameters and visualizing its changes, the possibility of archiving arrays of received data, the possibility of changing the operating modes of the electric motor and ways of displaying information. The performance characteristics of a prototype device for measuring the torque of an electric motor based on an inductive sensor used as part of the proposed measuring system have been studied.

The article presents the possibilities of using an information-measuring system in combination with additional measuring devices that can be connected to it using a local network, thus forming a distributed sensor network of measuring devices interconnected via a radio channel. The expediency of building such networks for remote objects, where unified (WI-FI, WI-MAX, GSM) data transmission technologies can be used, is substantiated.

Keywords: torque measurement, electric motor, measuring, software, microcontroller, signal processing, data transfer protocol, server.

[DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-42-52](https://doi.org/10.32684/2412-5288-2021-1-18-42-52)

Вступ

Для визначення технічного стану та робочих характеристик електричних двигунів (ЕД) використовують аналіз електричної потужності, аналіз моменту сили, напруги та струмового сигналу.

Більшого поширення набули методи діагностування ЕД по струмовому сигналу, які реєструється з обмоток приводу. Це обумовлено мобільністю та оперативністю отримання результатів обстеження, можливістю проведення дистанційних вимірювань, коли доступ до об'єкта діагностування ускладнений, або неможливий.

В залежності від потреб в точності використовують і контактні засоби вимірювання обертових моментів також, перетворюючи ряд фізичних величин в уніфікований сигнал.

В будь-якому випадку, прийняття рішення про технічний стан ЕД та їх робочих характеристик загалом, здійснюється на основі стандартизованої процедури вимірювання, об'єктивність якої визначається точністю даних, як вимірювальних приладів, так і ІВС. Тому, подальше підвищення точності результатів діагностичного обстеження ЕД може бути здійснено за рахунок вдосконалення використовуваних методів обробки даних та способів вимірювання.

Вимірювання обертового моменту валу електродвигуна в статичному режимі не викликає труднощів, проте вимірювання безперервно в процесі обертання є завданням більш складним, особливо коли це стосується мікроелектродвигунів.

Так, переважна більшість приладів для вимірювання обертового моменту ЕД побудовано на основі вимірювання струму, який прикладається до двигуна. Разом з цим, такі вимірювання не можна застосовувати для мікроелектродвигунів, оскільки невеликі потужності висувають ряд додаткових вимог до чутливості вимірювальних приладів.

Істотний вплив на показники точності сенсорів мають вібрації, нестабільності індуктивних характеристик, нестабільності напруги джерела живлення, температурний режим роботи, швидкість обертання валу та стан підшипникових вузлів електродвигуна.

В таких умовах, існує потреба в систематизації вимірювань шляхом обробки більшої кількості даних, що дозволить не лише отримувати поточні показники, а й проводити прогнозування зміни похибок та визначення потреб у калібруванні вимірювальних приладів, визначати критерії виникнення додаткових вібрацій, зміни температурних режимів, тощо.

В свою чергу, недостатня кількість інформативних параметрів, які можна отримати під час вимірювання робочих характеристик ЕД, звужує коло методів, що застосовуються для підвищення точності вимірювальних приладів.

Усе це, та багато інших не вирішених питань, пов'язаних із недостатньою кількістю інформативних параметрів вимірювання робочих характеристик ЕД, потребує створення гнучких та розподілених інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які мають поєднувати вимірювальні пристрої та засоби прогнозування аварійних режимів роботи ЕД в єдиний інформаційний простір підприємства.

Аналіз публікацій та досліджень

Сучасні системи діагностики робочих характеристик електродвигунів, окрім обертового моменту та потужності, використовують: вібродіагностику; аналіз електричних струмів та напруг; вимірювання теплових полів та магнітних полів, електромагнітну дефектоскопію [1, 2]. Широко застосовуються методи сигнатурного аналізу, які включають в себе методи обробки сигналу шляхом перетворення Фур'є, Гілберта-Хуана та вейвлет-перетворення [3, 4].

При дослідженнях електромеханічних систем часто виникає необхідність визначення обертових моментів та прискорень.

Методологія вимірювання динамічних характеристик обертальних моментів ЕД та прискорень, недостатньо висвітлені в технічній літературі. Переважна більшість праць спрямована на вимірювання лінійних прискорень, а питанням вимірювання нелінійних кутових прискорень, приділяється мало уваги [5, 6]. Тому, актуальними є дослідження нелінійних характеристик роботи електродвигунів.

Так, для моделювання динамічних характеристик обертального моменту в роботі [7] представлено модифіковану формулу Клосса, яка пов'язує середнє значення обертального моменту електродвигуна та частоту обертання його валу, з урахуванням впливу частоти обертання та напруги живлення. За даною моделлю отримано механічні характеристики електродвигуна, які пред-

ставляють залежність обертального моменту від частоти обертання валу ЕД, напруги мережі, частоти мережі та ряду інших номінальних параметрів. В даній роботі застосовано метод імітаційного моделювання моменту зупинки ЕД без навантаження. Реалізацію моделі було здійснено в середовищі Matlab/Simulink.

На основі запропонованого виразу було також побудовано модель для декількох робочих характеристик асинхронного ЕД змінного струму.

Моделювання здійснено з використанням програмної бібліотеки Matplotlib мовою програмування Python, що дозволило отримати наступні результати (рис. 1).

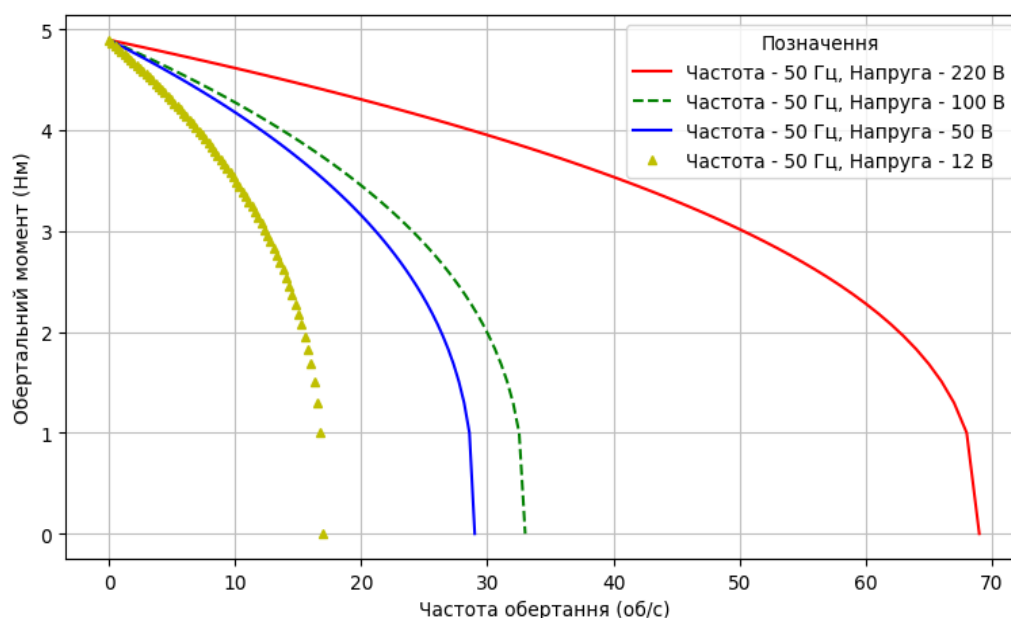


Рисунок 1 – Робочі характеристики ЕД

Розроблено на основі джерела [8] з використанням програмної бібліотеки Matplotlib

Так, при напрузі в 220 В частота обертання валу та момент сили у період моделювання (5 с) були найбільшими. Це говорить про адекватність моделі.

Разом з тим, вона не містить, параметрів струму та опору котушок статора. Не враховано електромагнітних вібрацій, які впливають на обертальний момент валу ЕД.

В роботі [8] представлено методику, що дозволяє визначити момент інерції ЕД обчислювальними засобами, тестування якої, з використанням корекції параметрів регуляторів приводу дозволило встановити параметри кривої розгону шляхом проведення імітаційного моделювання з

використанням пакета SimPowerSystems у середовищі MatLab. Це дозволило вдосконалити методику вимірювання моменту інерції електроприводу на основі методу площ Симою [9]. Похибка при визначенні моменту інерції була 1,5 %. Цей метод дозволяє визначити передатні характеристики функції за кривою розгону. Але недоліком такого методу є те, що передатні характеристики для кожного окремого виду електродвигуна є різними та їх вибір для кожного має певні складнощі. Тестування даної методики на інших видах ЕД не проводились.

Модель визначення моменту сили ЕД під час його роботи представлена в роботі [10], яка

також враховує момент інерції та момент опору навантаження:

$$M - M_o = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad (1)$$

де M – обертальний момент;

M_o – момент опору навантаження;

J_{Σ} – сумарний момент інерції приводу, приведений до валу двигуна;

ω – кутова швидкість двигуна;

t – час.

Важливою складовою у вимірюванні обертального моменту є визначення коефіцієнта тертя. Тому, заслуговує уваги робота [11], де запропоновано стенд, робота якого заснована на вимірі навантаження на ЕД з урахуванням сили тертя. Таке навантаження фіксується амперметром, включеним до ланцюга ЕД, де коефіцієнт тертя визначається за залежністю:

$$f = \frac{\sqrt{3U} (I_n - I_{x.p.}) \cos \varphi \cdot \eta}{2V_k \cdot M}, \quad (2)$$

де U – напруга;

I_n – струм навантаження;

$I_{x.p.}$ – струм холостого ходу двигуна;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності (де φ – зсув фаз між силою струму та напругою);

η – К.К.Д. підшипників кочення;

V_k – швидкість ковзання на контакті;

M – обертальний момент.

Зазначені методи вимірювання лежать в основі переважної більшості ІВС. Разом з тим, в багатьох випадках вибір методу залежить від умов, в яких проводиться вимірювання, де необхідно визначити найбільш оптимальні методи вимірювання. Так, в деяких випадках силою тертя, або вібрацією можна знехтувати, в той час, коли важливими параметрами виступають струм, напруга та потужність ЕД.

Для визначення потреб придатності вимірювального обладнання враховуються особливості отримання сигналу від перетворювачів різного типу та методи його обробки.

Разом з тим, комплексна ІВС має передбачати не лише засоби поточного вимірювання, але й сховище даних, де має зберігатися статистична інформація, яка може бути використана для визначення окремих режимів роботи ЕД.

Тому, слід звернути увагу на роботи, які висвітлюють не лише способи первинного збору даних та обробку сигналу, але й подальшу його візуалізацію та обробку на більш високому рівні [12].

Постановка завдання

Представити етапи розробки прототипу ІВС, яка призначена для вимірювання робочих характеристик ЕД. Зокрема обертального моменту, напруги, струму та швидкості обертання валу.

Розробка ІВС для дослідження робочих характеристик ЕД постійного струму на прикладі RS-775.

Вимірювання обертального моменту та швидкості роботи ЕД вимагає чутливості сенсорів. Такими, наприклад, є тензометричні сенсори. Тому для роботи у складі ІВС було вибрано тензометричний сенсор мостового типу (рис. 2). Тензометричний сенсор використано разом із мікросхемою НХ711. Дана мікросхема є аналого-цифровим перетворювачем з розрядністю 24 біти та має вбудований операційний підсилювач [13].

На рис. 2 представлено: +Ex, -Ex – вхідна напруга; +S, -S – вихідний сигнал та R1-R4 – тензометричні резистори, які змінюють свій опір в залежності від деформації.

Запропонована мікросхема включає інтегральний стабілізатор напруги, що дозволяє не використовувати зовнішній стабілізатор.

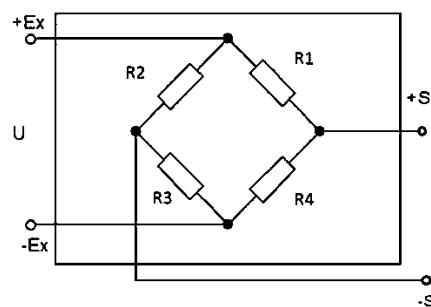


Рисунок 2 – Мостова схема тензометричного сенсора

Датчик швидкості обертання валу електродвигуна реалізований за принципом частотного вимірювача, який побудовано на базі оптичного сенсора, що фіксує обертання генеруючи імпульси з кожним оборотом. Їх обробляє мікроконтролер Atmega 8 та передає отриманий результат до мікроконтролеру ESP32, використовуючи послідовну шину зв'язку I2C.

Оскільки Atmega 8 може виявляти лише прямокутні сигнали, для перетворення сигналу було використано тригер Шмітта, що являє собою цифровий логічний елемент, призначений для арифметичних і логічних операцій. Він має пороговий рівень напруги. Так, коли рівень вхідного сигналу вище порогового рівня елемента, рівень сигналу на виході буде високим. Якщо рівень вхідного сигналу нижче порога, на виході

буде низький рівень. Для цього була використана мікросхема 74LS14, яка містить 6 триггерів Шмітта.

Для вимірювання частоти в мікроконтролері Atmega 8 використовуються два типи переривання: переривання за переповненням таймеру T0 і зовнішнє переривання за зміною сигналу на вході мікроконтролера INT0. Восьми-бітний таймер T0 працює з частотою 1 МГц, для цього програмно було включено дільник частоти на 8. Обробник переривання при переповненні таймеру викликається 4000 разів у секунду, при цьому змінний лічильник збільшує своє значення на одиницю. Як тільки ця змінна стане рівною 4000, тобто пройде 1 секунда, в змінну edgесount буде внесено кількість отриманих імпульсів за цей період. Дані про кількість імпульсів будуть збережені у масив. Програмний код для обробки імпульсного сигналу мікроконтролером Atmega 8 має наступний вигляд:

```
#include<avr/interrupt.h>
#include<util/delay.h>
volatile unsigned int edgесount = 0, count = 0;
// Обробник переривання по переповненню
T0 //викликається 4000 разів на секунду
ISR(TIMERO)
{
    TCNT0 = 6; // Лічильник T0 починає рахувати з // 6, оскільки 1MHz/(256-6) = 4000Hz
    count++;
}
// обробник зовнішнього переривання
ISR(INT0)
{
    edgесount++;
}
int main(void)
{
    // Налаштування портів введення/виводу
    DDRD = 0b11110011;
    PORTD = 0x00;
    // Налаштування таймеру T0
    TCCR0 |= (1 << CS01); // Дільник на частоту
на 8 //для таймеру 1 MHz
    TIMSK |= (1 << TOIE0); // Дозвіл на
//переривання таймеру T0
    // Налаштування зовнішнього переривання
    GICR |= (1 << INT0); // Дозволяємо зовнішнє
//переривання на вході INT0
    MCUCR |= (1 << ISC01)|(1 << ISC00); // Зовнішнє
//переривання формується по передньому фронту
    sei(); // Глобально дозволяємо переривання
    while(1)
    {
        // передаємо дані
```

```
if(count == 4000)
{
    send_data(edgесount);
    count = 0;
    edgесount = 0;
}
}
```

Дані про кількість імпульсів за хвилину від датчика швидкості та цифровий сигнал від АЦП, а також цифровий сигнал від датчиків вимірювання напруги та струму електродвигуна обробляється мікроконтролером ESP32, який має вбудований WIFI – модуль.

Використовуючи відомі програмні бібліотеки для роботи з протоколом TCP/IP, даний мікроконтролер був використаний для відправки http повідомлень методом POST, які містять кількісні характеристики обертового моменту, напруги, струму та швидкості обертання валу безконтактного двигуна постійного струму.

Принцип вимірювання обертового моменту, який передається валом електродвигуна отримано за допомогою спеціальної муфти, яка приєднана до плеча, використовуючи наступний вираз

$$M = F \cdot R = F \cdot R \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

де: M – момент сили;
 F – сила (Н);
 R – плече сили (м);
 α – кут між вектором сили F та вектором плеча сили R .

Функціональну схему IBC представлено на рис. 3.

Оброблений сигнал передається до головного мікроконтролера ESP32 з використанням протоколу I2C. Програмний код мікроконтролера ESP32 [14] реалізує не лише збір даних від сенсорів, але й їх передавання з використанням WEB-протоколу http, використовуючи Wi-Fi модуль мікроконтролера. Так, дані передаються до серверного додатку, який дозволяє їх візуалізувати та зберегти в базу даних SQLITE.

Серверна частина написана мовою програмування Python, використовуючи ряд серверних бібліотек.

WEB-інтерфейс додатку реалізовано із використанням мови програмування JavaScript та програмної бібліотеки plotly.js. Ознайомитись з програмним кодом серверного додатку можна за посиланням [15].

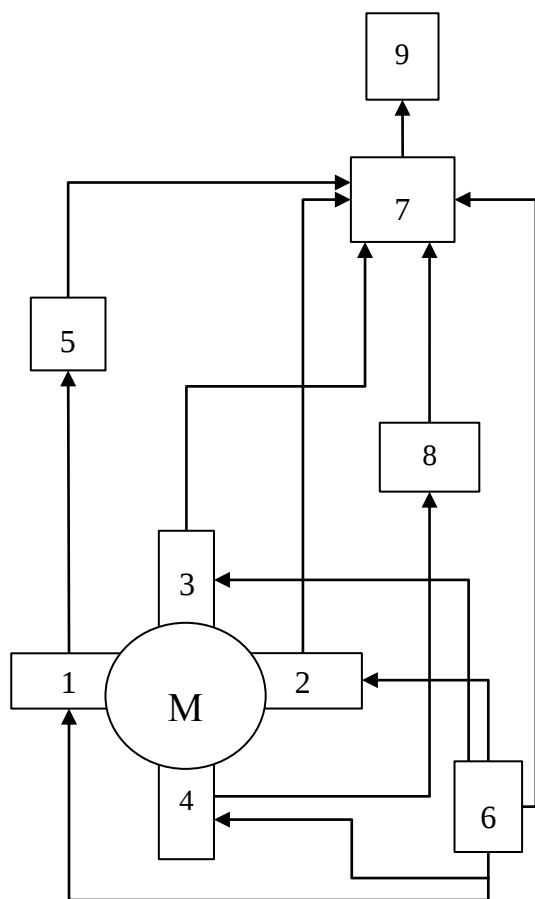


Рисунок 3 – Функціональна схема ІВС

М – електродвигун; 1 – оптичний сенсор, що фіксує обертання, генеруючи імпульси з кожним оборотом валу електродвигуна; 2 – цифровий модуль для вимірювання напруги; 3 – цифровий модуль для вимірювання струму; 4 – тензOMETричний міст; 5 – мікроконтролер Atmega 8; 6 – джерело живлення; 7 – мікроконтролер ESP32; 8 – АЦП HX711; 9 – WEB-сервер

Для тестування запропонованої ІВС, в середовищі Matlab/Simulink, було побудовано модель електродвигуна RS-775 з наступними робочими характеристиками (табл. 1).

Метою такого моделювання, було порівняння робочих характеристик ЕД RS-775, які були отримані шляхом моделювання в середовищі Matlab/Simulink та характеристик отриманих під час прямих вимірювань з використанням розробленого стенда, який входить до складу ІВС (рис. 4).

Модель вимірювального каналу, яка застосовується в середовищі Matlab/Simulink представлено на рис. 5.

Сигнал з тензOMETричного сенсора задається блоком «Сенсор». Блок «Генератор шуму» імітує вібрацію, яка виникає під час обертання валу ЕД. Генератор імпульсів імітує оптичний сенсор для вимірювання частоти. Генератор зразкової час-

тоти відтворює час, за який має відбуватись вимірювання імпульсів.

Таблиця 1 – Робочі характеристики електродвигуна RS-775

Номинальна напруга	V	6-12, В
Номинальний обертальний момент	T_e	1, Нм
Номинальна швидкість	N_r	3500, об/хв
Опір статора	R_s	5,5, Ом
Індуктивність статора	L	2,52, Гн
Інерція ротора	J_m	2,807, кг·м ²
Кількість пар полюсів	P_n	2

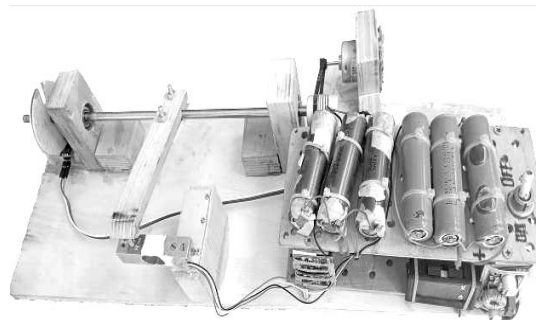


Рисунок 4 – Прототип приладу для вимірювання параметрів роботи ЕД

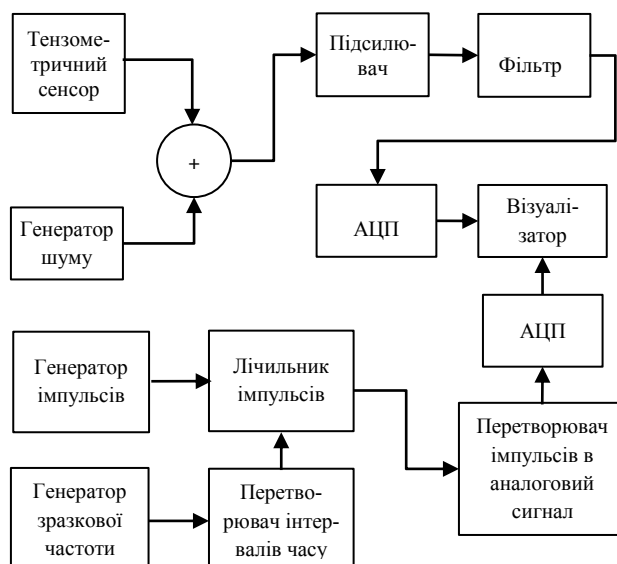


Рисунок 5 – Модель вимірювального каналу створена в Simulink

Лічильник імпульсів передає оброблений сигнал до перетворювача імпульсів в аналоговий

сигнал. Після чого сигнал надходить до АЦП та передається до візуалізатора.

У відповідності до джерела [16] передавальну функцію ЕД постійного струму по керуючому впливу з урахуванням перетворень можна записати наступним чином:

$$W_y(s) = \frac{I_y(s)}{U_y(s)} = \frac{k_I s}{(T_m T_e s^2 + T_m s + 1)}, \quad (4)$$

де $T_m = \frac{J R_y}{C_w C_e}$ – механічна постійна часу

двигуна; $T_e = \frac{L_y}{R_y}$ – електротехнічна постійна

часу роботи двигуна; $k_I = \frac{J}{C_w C_e}$ – коефіцієнт

передачі по струму; I_y – струм в якірному ланцюгу ЕД; R_y – опір якірного ланцюга, що рівний сумі опору якірних обмоток ЕД та вхідного опору підсилювача, Ом; L_y – сума індуктивностей якірного ланцюга двигуна та вихідного ланцюга підсилювача, Гн; J – момент інерції якоря, Нм²; C_e – коефіцієнт моменту сили, Н·м; C_w – швидкості, В·с/рад; s – оператор Лапласа; U_y – напруга.

Змодельовавши криву розгону ЕД та його роботу за час в 0,25 с, отримаємо наступну робочу характеристику швидкості обертання (рис. 6)

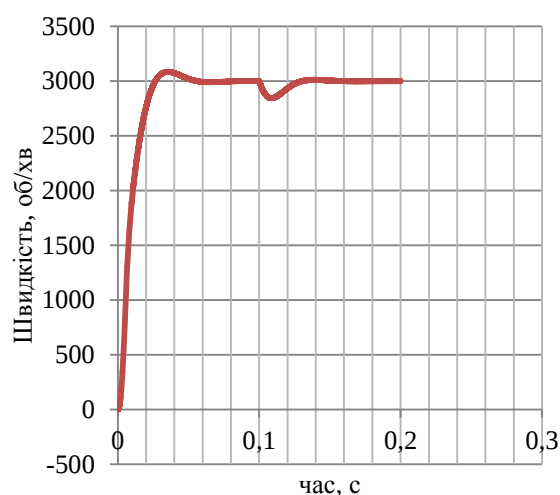


Рисунок 6 – Модель кривої розгону ЕД

Електромагнітний момент має наступні характеристики (рис. 7).

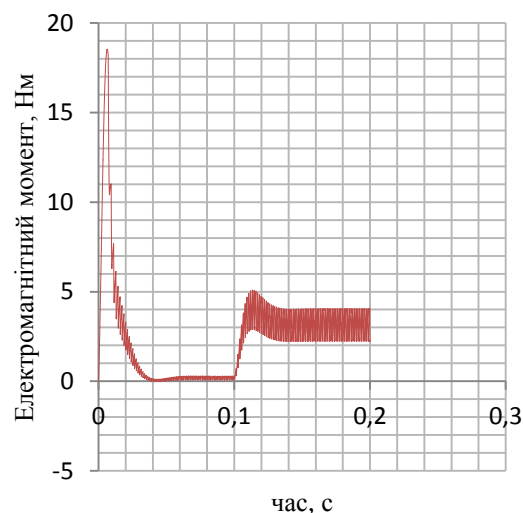


Рисунок 7 – Динаміка зміни електромагнітного моменту

Середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни електромагнітного моменту, отримане за виразом

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (5)$$

складає 3,86.

Динаміка зміни напруги представлена на рис. 8, де стрибки напруги обумовлені частотними характеристиками джерела живлення, моделювання якого реалізовано на прикладі імпульсного перетворювача.

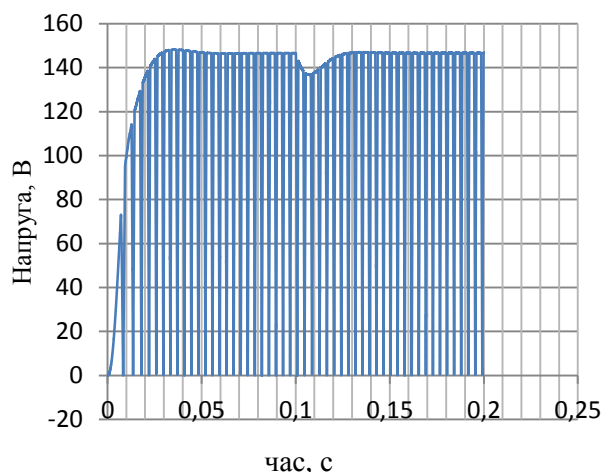


Рисунок 8 – Динаміка зміни напруги

Залежність швидкості обертання та електромагнітного моменту представлено на рис. 9, де видно, що на швидкості більше 1500 об/хв, момент сили набуває синусоїдальної форми. Саме в цей період, спостерігається вплив пульсуючого струму.

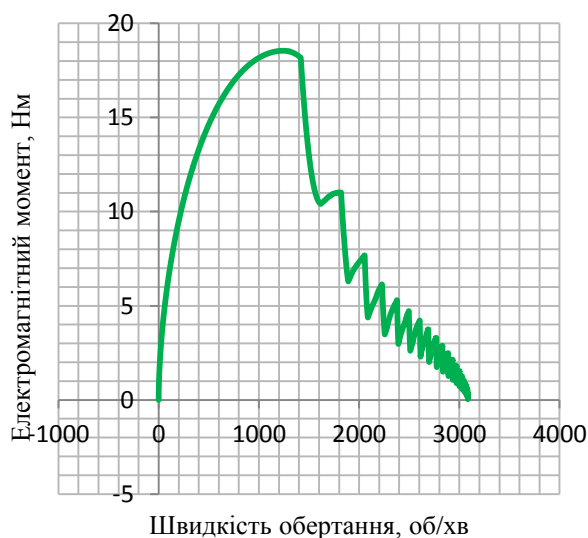


Рисунок 9 – Залежність обертового моменту та швидкості обертання ЕД

На рис. 7 видно вплив вібрації у вигляді відхилень постійної частоти, що значно ускладнює вимірювання. На рис. 9, також спостерігаються стрибки напруги у вигляді пульсацій.

Усе, та багато інших впливів на вимірювальний сигнал, які обумовлені його пульсацією потребує гасіння таких імпульсів шляхом згладжування кривої.

Для вирішення цієї проблеми, апроксимовано криву розгону, що представлена на рис. 7 методом віконних перетворювань Ханна (Хеммінга), в основі якого лежить згладжування розривів на початку та в кінці імпульсного сигналу [17]:

$$\omega(n) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), \quad 0 \leq n \leq M-1, \quad (6)$$

де M – ширина вікна.

Після апроксимації кривої розгону, отримане середньоквадратичне відхилення склало 2,61, що дозволило зменшити похибку з 3,86 до 2,61. Результати представлено на рис. 10.

Тестування прототипу пристрою для вимірювання обертового моменту ЕД, який входить до складу запропонованої ІВС показало наступні результати.

Разом з тим, на рис. 11 видно, що під час запуску, коли двигун ЕД потребує найбільшого моменту сили, для того, щоб набрати потрібні оберти, такий спосіб не може бути використаний у зв'язку із значною похибкою. Так, на рис. 11, в точці X_n значення кривих отриманих в результаті апроксимації та вихідних параметрів сигналу отриманого у відповідності до функціональної схеми ІВС (рис. 3), суттєво різняться. Тому в цьому аспекті є потреба у подальших дослідженнях спрямованих на зменшення впливу шумів на

результуючий вихідний сигнал.

Перехідна характеристика обертового моменту під час запуску ЕД та його роботи впродовж 20 с представлена на рис. 11, де з використанням виразу (6) було проведено подвійну апроксимацію кривої розгону, що дозволило скоротити стандартне відхилення, викликане вібрацією з 3,06 до 1,83.

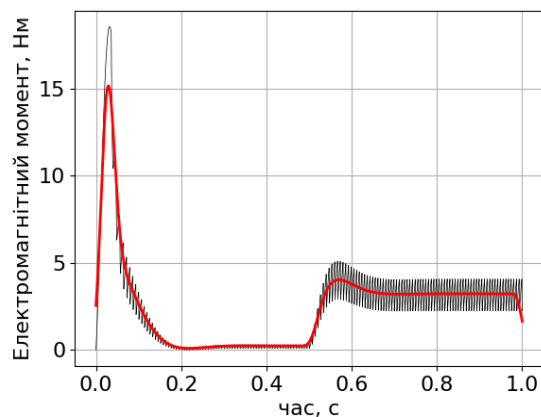


Рисунок 10 – Результати апроксимації кривої розгону шляхом зважування вікном Ханна (Хеммінга)

Створено з використанням програмної бібліотеки matplotlib

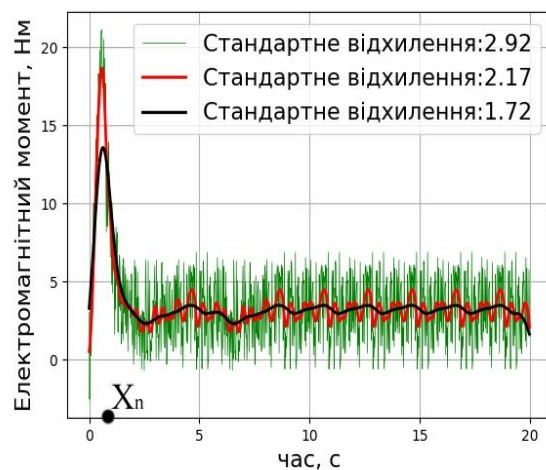


Рисунок 11 – Подвійна апроксимація сигналу, отриманого у відповідності до рис. 3, з використанням тензометричного сенсора

З метою дослідження похибки вимірювання швидкості, проведено порівняння отриманих результатів моделювання та експериментальних даних, які отримані з використанням вимірювального стенда. Для цього було проведено 5 експериментальних запусків ЕД та отримано криві розгону (рис. 12), де визначено відхилення від очікуваних результатів, середнє значення якого склало 20 %.

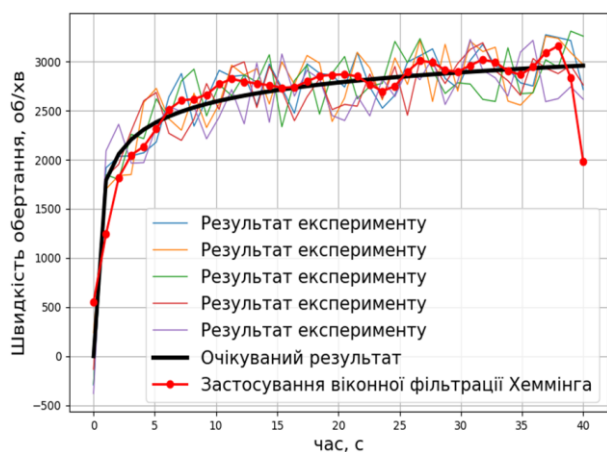


Рисунок 12 – Криві розгону ЕД

До отриманих в результаті дослідження кривих було застосовано вираз (6), що дозволило зменшити відхилення до 17 %. Так, стандартне відхилення отриманих результатів склало 5,8. Після застосування виразу (6) стандартне відхилення склало 5,02.

Висновки

Реалізація методів безпосереднього вимірювання у запропонованій ІВС з використанням датчика НХ711 для вимірювання обертового моменту та лічильника імпульсів, які генерує оптичний сенсор з метою вимірювання швидкості обертання валу ЕД, дозволила отримати наступні результати.

Проведення імітаційного моделювання параметрів ЕД постійного струму в середовищі Matlab/Simulink, дозволило отримати перехідні характеристики сигналу від тензOMETричного сенсора створеного для імітації вимірювання обертового моменту. З метою моделювання швидкості обертання валу. Для моделювання вібрації, був створений генератор імпульсів регульованої частоти.

Застосована в моделі передавальна функція (4) показала, що вплив вібрації зменшує точність вимірювання, середньоквадратичне відхилення якого склало 3,86 %. Для нівелювання такого впливу було використано віконне згладжування Хеммінга (6), що дозволило частково зменшити вплив вібрації. Середньоквадратичне відхилення в такому випадку складало 1,83 %.

Такий спосіб було застосовано для запропонованого вимірювального стенда провівши серію послідовних вимірів. Середньоквадратичне відхилення при вимірюванні обертового моменту вдалось зменшити з 2,92 % до 1,72 %. Похибку при вимірювання швидкості зменшено з 5,8 % до 5,02 %.

Список використаних джерел

1. Вахромеев О. С., Каримов Р. Т., Надеев А. И. Современные методы диагностики электромеханических систем. М.: Машиностроение, 2005. С. 51-56. DOI: 10.7463/1015.0820865
2. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23, iss. 8, pp. 2658-2670. DOI:10.1016/j.ymssp.2009.05.011
3. Ayaz E., Ozturk A., & Seker S. (2006). Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. *IEEE Electrotechnical Conference, MELECON*. Mediterranean, pp. 1130-1133.
4. Cabal-Yepez E., Osornio-Rios R., Romcro-Troncoso R., Razo-Hernandez J., & Lopez-Carcia, R. (2009). FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. *International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs*, pp. 101-106.
5. Мансуров Т. М., Алиев Ч. П. Акселерометр для измерения параметров движущихся объектов. *Научный журнал «Проблемы инфокоммуникаций» Белорусской государственной академии связи*. Минск, 2017. № 2 (6). С. 37-46.
6. Мансуров Т. М., Алиев Ч. П. Акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов в автоматическом режиме. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 5 (265). С. 78-83.
7. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
8. Ермаков К. С., Тумакова Е. В. Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя. *Наука и Образование*. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 211-220. DOI: 10.7463/1015.0820865
9. Стельмашук С. В. Определение момента инерции электропривода по кривой разгона методом Симою. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 6. С. 103-113.
10. Симою М. П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования. *Автоматика и телемеханика*. 1957. № 6. С. 514-527.
11. Кононенко Е. В., Данчинов Б. А. Влияние момента инерции и момента сопротивления привода на переходные процессы пуска и реверса рольганговых двигателей. *Известия Томского политехнического института*. 1971. Т. 212:

Электрические машины. С. 496-502.

12. Юсупов Р. Р., Жиркин Ю. В., МIRONENKOV E. И., Губарев Е. В. Исследование влияния карбонитрирования на снижение коэффициента трения. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 72-й международной научно-технической конференции / под ред. В. М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. Т.1. С. 214-216.*

13. Жидков В. А. Сравнительный анализ SCADA-систем, применяемых в диспетчерских службах Белгородской энергосистемы. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2012. № 1. С. 185-189.*

14. Тензодатчики и HX711. Руководство пользователя [Электронный ресурс]: за данными сайта wiki.iarduino.ru / Режим доступа: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo.

15. Maier A., Sharp A., Vagapov Y. "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things" 2017 *Internet Technologies and Applications, ITA 2017 – Proceedings of the 7th International Conference IEEE*, pp 143-148, November 2017, DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.

16. Квашук Д. Программний код WEB-додатку інформаційної системи для вимірювання параметрів роботи електродвигунів [Електронний ресурс]. 2021. Режим доступу: <http://dmitro.pythonanywhere.com>.

17. Рубанов В. Г., Бушуев Д. А., Парашук Е. М., Трикула А. К. Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики. *Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 97-108. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.*

18. Douglas A. Time Sequence Analysis in Geophysics E. R. Kanasevich (University of Alberta Press), *Geophysical Journal International*, Volume 43, Issue 3, December 1975, Page 1026, DOI:10.1093/gji/43.3.1026.

References

1. Vakhromeev O. S., Karimov R. T., Nadeev A. I. Sovremennye metody diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem [Modern methods of diagnosis of electromechanical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, pp. 51-56. DOI: 10.7463/1015.0820865

2. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-

filtered motor current. *Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. Vol. 23, iss. 8. P. 2658-2670. DOI: 10.1016/j.ymssp.2009.05.011*

3. Ayaz, E., Ozturk, A., & Seker, S. (2006). Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. *IEEE Electrotechnical Conference, MELECON. Mediterranean*, pp. 1130-1133.

4. Cabal-Yepez E., Osornio-Rios R., Romcro-Troncoso R., Razo-Hernandez J., & Lopez-Carcia, R. (2009). FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. *International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs*, pp. 101-106.

5. Mansurov T. M., Aliev Ch. P. Akselerometr dlya izmereniya parametrov dvizhushhixsya ob"ektov. [Accelerometer for measuring the parameters of moving objects]. *Nauchnyj zhurnal «Problemy infokommunikacij» Belorusskoj gosudarstvennoj akademii svyazi. Minsk, 2017. № 2 (6). S. 37-46.*

6. Mansurov T. M., Aliev Ch. P. Akselerometr dlya izmereniya uskorenij i skorostej dvizhushhixsya ob"ektov v avtomaticheskom rezhime. [The Accelerometer for Measurement of Accelerations And Speeds of Moving Objects in the Automatic Mode] *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nuky. 2018. # 5 (265). S. 78-83.*

7. Brindli K. Izmeritel'nye preobrazovateli: Spravochnoe posobie: Per. s angl. M.: E'nergoatomizdat, 1991. 144 s. [Brindley K. Sensors and Transducers. London, 1988]

8. Ermakov K. S., Tumakova E. V. Informacionno-izmeritel'naya sistema dlya kontrolya e'lektricheskix i mexanicheskix parametrov e'lektrodvigatelya. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E'. Bauman. E'lektron. zhurn. 2015. № 10. S. 211-220.*

9. Stel'mashhuk S. V. Opredelenie momenta inercii e'lektroprivoda po krivoj razgona metodom Simoyu. [Identification of Electric Drive Inertia Moment on the Reaction Curve by Simoyu Method]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2015. № 6. S. 103-113.*

10. Simoyu M. P. Opredelenie koe'fficientov peredatochnyx funkciy linearizovannyx zven'ev sistem regulirovaniya. *Avtomatika i telemexanika. 1957. № 6. S. 514-527.*

11. Kononenko E. V., Danchinov B. A. Vliyanie momenta inercii i momenta soprotivleniya privoda na perexodnye processy puska i reversa rol'gangovykh dvigatelej. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo instituta. 1971. T. 212: E'lektricheskie mashiny. S. 496-502.*

12. Yusupov P. P., Zhirkin Yu. V., MIRONENKOV E. I., Gubarev E. V. Issledovanie vliyaniya karboni-

trirovaniya na snizhenie koefficienta treniya. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 72-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii / pod red. V.M. Kolokol'ceva*. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. texn. un-ta im. G.I. Nosova, 2014. T.1. S. 214-216.

13. Zhidkov V. A. Sravnitel'nyj analiz SCADA-sistem, primenyaemyx v dispetcherskix sluzhbx Belgorodskoj e'nergosistemy. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuxova*. 2012. № 1. S. 185-189.

14. Tenzodatchiki i NX711. Rukovodstvo pol'zovatelya [E'lektronnyj resurs]: za dannymi sajta wiki.iarduino.ru / Rezhim dostupa: https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo.

15. Maier A., Sharp A., Vagapov Y. "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things" 2017 *Internet Technologies and Applications, ITA 2017* – Proceedings of the 7th International Conference IEEE, pp 143-148, November 2017, DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.

16. Kvashuk D. Prohramnyi kod WEB-dodatku informatsiinoi systemy dlia vymiriuvannia paramet-riv roboty elektrodvyhuniv [Elektronnyi resurs]. 2021. Rezhym dostupu: <http://dmitro.pythonanywhere.com>.

17. Rubanov V. G., Bushuev D. A., Parashchuk E. M., Trikola A. K. Identifikatsiya momenta inertsii yakorya dvigatelya postoyannogo toka i nagruzki v e'ksperimental'noy vibratsionnoy ustanovke dlia issledovaniya khaoticheskoy dinamiki [Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019. T. 23, № 2. S. 97-108.

18. Douglas A. Time Sequence Analysis in Geophysics E. R. Kanasevich (University of Alberta Press), *Geophysical Journal International*, Volume 43, Issue 3, December 1975, Page 1026, DOI:10.1093/gji/43.3.1026.

Надійшла до редакції 28.08.2021

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Балашов Д. О.	23	Кузнєцова Л. В.	14
Горін В. В.	31	Курмаш А. М.	14
Катаєва М. О.	42	Мілованов О. М.	23
Квасніков В. П.	42	Середа В. В.	31
Квашук Д. М.	42	Сичов М. І.	6
Коломієць Л. В.	14, 31		

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БАЛАШОВ
Дмитро Олександрович

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського, інженер кафедри компресорів та пневмоагрегатів

ГОРІН
Вадим Вікторович

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

КАТАЄВА
Марія Олександрівна

Національний авіаційний університет, м. Київ, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат технічних наук, доцент

КВАСНІКОВ
Володимир Павлович

Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, доктор технічних наук, професор, заслужений метролог України

КВАШУК
Дмитро Михайлович

Національний авіаційний університет, м. Київ, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат економічних наук, доцент

КОЛОМІЄЦЬ
Леонід Володимирович

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань, доктор технічних наук, професор

КУЗНЄЦОВА
Любов Вікторівна

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, старший викладач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

КУРМАШ
Анна Михайлівна

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, аспірант кафедри стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань

МІЛОВАНОВ
Валерій Іванович

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського, завідувач кафедри компресорів та пневмоагрегатів, доктор технічних наук, професор

СЕРЕДА
Володимир Володимирович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та промислової теплотехніки

СИЧОВ
Михайло Іванович

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, кандидат технічних наук, доцент



**СВІТЛИЙ ПАМ'ЯТІ
ВИДНОГО ОСВІТЯНИНА
ТА НАУКОВЦЯ,
НАШОГО КОЛЕГИ І
ТОВАРИША –
ВОЛОДИМИРА НОВІКОВА**

На 62-му році трагічно пішов із життя внаслідок нещасного випадку видний освітянин та науковець, професор, доктор фізико-математичних наук, академік Міжнародної академії стандартизації, заслужений винахідник СРСР, відмінник освіти України, європейський експерт в сфері метрології, стандартизації та оцінки відповідності, наш колега і товариш – **Володимир Миколайович Новіков**.

Уся його активна і плідна трудова діяльність була нерозривно пов'язана з розвитком сфер технічного регулювання та споживчої політики, у тому числі працюючи на посадах заступника генерального директора Державного підприємства «Український науково-дослідний та навчальний центр з проблем стандартизації, сертифікації та якості» Держспоживстандарту України, директора Інституту підвищення кваліфікації фахівців у сфері технічного регулювання та споживчої політики Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку (Одеської державної академії технічного регулювання та якості), голови Атестаційної комісії Національного агентства з акредитації України, члена керівної ради національного органу стандартизації.

Тривалий час Володимир Миколайович плідно працював в громадських організаціях «Союз споживачів України» та «Міжнародна Академія Стандартизації», піклуючись про захист конституційних прав наших співвітчизників на якісне і безпечне життя на рівні європейських та світових стандартів.

Безумовно, для близьких та рідних – це непоправна втрата, для всіх нас – це спільне відчуття глибокого суму. Він залишив при житті добру про себе пам'ять як небайдужої, чесної і порядної людини з великої літери, та хороші справи, про які ми всі будемо пам'ятати з почуттям шанування.

Редакційна колегія наукового видання «Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості», постійним членом якої Новіков В. М. був від його заснування, висловлює щирі слова співчуття рідним, друзям та колегам з приводу смерті Володимира Миколайовича.

Наукове видання

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ**

Випуск 1(18) 2021

Редактор

Братченко Г. Д.

Комп'ютерна верстка

Постоварова В. Д.

Адреса редакції: 65020, м. Одеса, вул. Ковальська 15, ОДАТРЯ,
Тел.: (048)726-68-92 – довідки;
E-mail: bratchenkohd@gmail.com

*Надруковано з готового оригінал-макету
у друкарні «Апрель»
ФОП Бондаренко М. О.*

*Підписано до друку 24.09.2021
Формат 60*88/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 6,5
Тираж 100 прим.
65045, м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60.
www.aprel.od.ua*