

УДК 677.055

ДВОРЖАК В. М.

Київський національний університет технологій та дизайну

ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ЧЕТВЕРТОГО КЛАСУ ДЛЯ ПРИВОДУ ВУШКОВИХ ГОЛОК ОСНОВОВ'ЯЗальної МАШИНИ

Мета. Розроблення та дослідження функціонально-адекватних цільових механізмів технологічних машин легкої промисловості із застосуванням прикладних САЕ-програм.

Методика. Використані апарат векторної алгебри; аналітичний та чисельний методи визначення функцій положення плоских механізмів, що містять структурну групу четвертого класу другого порядку, на основі векторного перетворення координат; метод випадкового пошуку для метричного синтезу плоских механізмів; методи комп'ютерної візуалізації та анімації кінематичних схем плоских механізмів вищих класів.

Результати. Отримані математичні моделі, що описують функції положення механізму вушкових голок основов'язальної машини, що містить структурну групу четвертого класу другого порядку з обертальними кінематичними парами, у вигляді кутів рухомих ланок, вільних векторів, побудованих на цих ланках, та радіус-векторів характерних точок механізму у функції кута повороту ведучого кривошипа. Визначені геометричні параметри плоского шестиланкового механізму вушкових голок для основов'язальної машини, що містить структурну групу четвертого класу другого порядку з обертальними кінематичними парами у результаті метричного синтезу механізму методом випадкового пошуку в САЕ-програмі; виконано комп'ютерне схемотехнічне моделювання отриманого механізму; побудовані графіки візуалізації та анімації кінематичної схеми отриманого механізму; проведена ідентифікація складання кінематичної схеми отриманого механізму на предмет відповідності прийнятій структурі; отриманий графік функції положення вушкової голки механізму четвертого класу; виконано порівняння функцій положення вушкової голки нового механізму та механізму основов'язальної машини ОВ-7.

Наукова новизна. Запропонована структура плоского шестиланкового механізму, що містить структурні групи четвертого класу другого порядку з обертальними кінематичними парами, для застосування в якості приводного в основов'язальній машині на прикладі механізму коливального руху вушкових голок. Визначені геометричні розміри рухомих ланок функціонально-адекватного механізму четвертого класу для приводу вушкових голок основов'язальної машини. Створені програмні блоки для автоматизованого комп'ютерного метричного синтезу та розрахунку кутів ланок та радіус-векторів характерних точок механізму в САЕ-програмі.

Практична значимість роботи полягає у використанні одержаних результатів для проектування та конструювання плоских механізмів четвертого класу з обертальними кінематичними парами основов'язальних машин, у яких робочі органи здійснюють зупинення при виконанні робочого процесу.

Ключові слова: механізм четвертого класу, структурна група четвертого класу, механізм вушкових голок, основов'язальна машина.

Вступ. При виконанні процесу петлетворення на основов'язальних машинах петлетвірні органи здійснюють складний плоский або просторовий рух, який забезпечують, головним чином, важільні механізми. Характерною особливістю процесу петлетворення на основов'язальних машинах є сповільнення руху, зупинення та здійснення зворотного ходу петлетвірних органів за цикл утворення петлі. При цьому робочі точки петлетвірних органів можуть відтворювати траєкторії у вигляді відрізка прямої, дуги кола, плоскої або просторової шатунної кривої. Для реалізації складних законів руху та траєкторій петлетвірних органів при збереженні високих швидкостей роботи в основов'язальних

машинах застосовуються багатоланкові плоскі важільні механізми другого та третього класів. Крім того, у деяких конструкціях машин використовуються багатоланкові плоскі важільні механізми третього класу з двома та трьома ведучими кривошипами [1].

Взагалі, останнім часом спостерігається тенденція активного дослідження та застосування плоских механізмів вищих класів, у тому числі складної структури з обертальними та поступальними кінематичними парами, про що свідчать роботи [2-8] і, зокрема, роботи [9-14], які пов'язані з дослідженнями плоских механізмів третього класу основов'язальних машин. Однак питання використання в технологічних машинах механізмів, які містять структурну групу ланок вищу за третю для реалізації процесу петлетворення із зупиненням петлетвірного органу, мало досліджені. Причиною цього слід вважати складність кінематичного аналізу та синтезу механізмів четвертого та вище класів та відсутність відповідних комп'ютерних методів дослідження та уніфікованих способів верифікації отриманих результатів.

Тому розроблення і дослідження функціонально-досконалих плоских механізмів вищих класів для приводу петлетвірних органів основов'язальних машин, здатних реалізовувати потрібні закони руху, у тому числі із зупинками, є актуальною задачею.

Постановка завдання. Завданням цього дослідження є розроблення структурної та кінематичної схеми та схемотехнічне комп'ютерне моделювання шестиланкового плоского механізму четвертого класу, який містить структурну групу четвертого класу другого порядку, з метою його застосування для приводу петлетвірних органів основов'язальних машин.

Результати дослідження. Розглянемо структуру механізму, що розміщується у вертикальній площині XU правосторонньої системи координат (далі ПСК) з початком в точці P_1 (рис. 1). Представимо ланки механізму у вигляді вільних векторів (рис. 2): P_{1-2} – вектору ведучого кривошипа, P_{2-3} , P_{3-4} та P_{2-4} – векторів першого шатуна, P_{3-6} – вектору другого шатуна, P_{4-5} – вектору третього шатуна та P_{7-5} , P_{7-6} та P_{5-6} – векторів коромисла. Довжини векторів позначимо L_{i-j} з відповідними до векторів індексами. Перший, другий, третій шатуни та коромисло утворюють структурну групу четвертого класу другого порядку, яка приєднується до ведучого кривошипа. Ведучий кривошип та коромисло з'єднуються зі стояком механізму. Робочою точкою є точка P_8 – центр вічка вушкової голки, рух якої характеризується вектором P_{7-8} . Усі ланки механізму утворюють обертальні кінематичні пари п'ятого класу. Таким чином, механізм має шість ланок, дві з яких з'єднані зі стояком. При цьому він містить на дві рухомі ланки та два стояки менше, ніж подібний механізм другого класу, який використовується в машині ОВ-7 для приводу вушкових голок [1], та на один стояк менше, ніж механізм третього класу, який пропонується використовувати для приводу вушкових голок основов'язальної машини в роботі [14].

При побудові графіків закону руху робочої точки механізму за початкове положення приймемо таке положення механізму, коли вушкові голки починають свій рух вперед після завершення зупинки за спинками крючкових голок (початок етапу прокладання ниток основи). Узагальненою координатою механізму приймемо кут φ_1 повороту ведучого кривошипа.

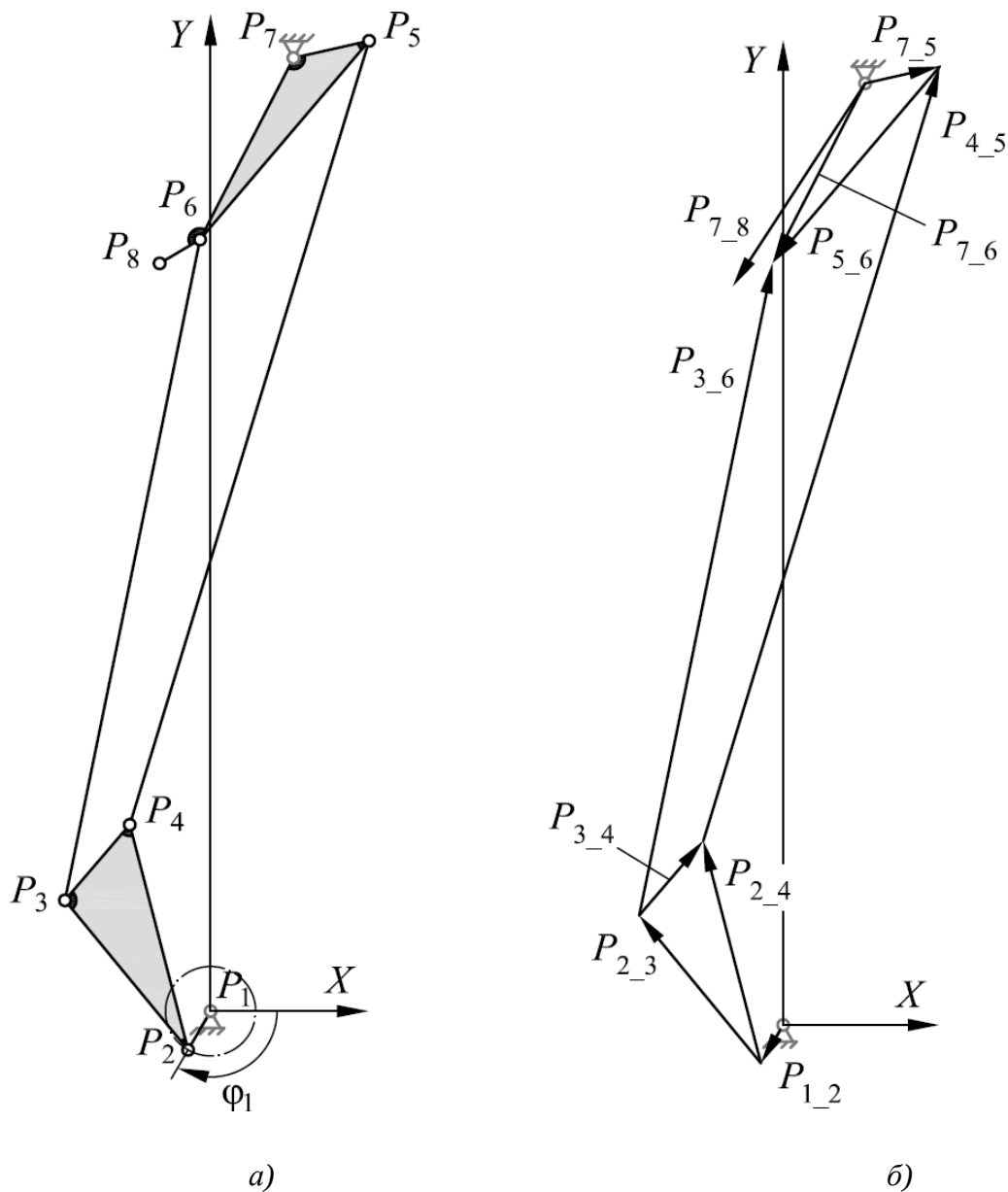


Рис. 1. Схеми плоского шестиштанкового механізму четвертого класу для приводу вушкових голок основ'язальної машини: а – структурна; б – кінематична (векторна)

Робоча точка P_8 повинна відтворювати траєкторію у вигляді дуги кола за законом «рух вперед-рух назад-зупинення», як наприклад, у машині ОВ-7 (рис. 2). При цьому рухи вперед, назад та зупинення здійснюються робочою точкою P_8 за 120° кута повороту ведучого кривошипа кожен, хід коромисла з гребінкою з вушковими голками складає $5,45^\circ$, лінійний хід робочої точки P_8 вушкової голки складає 13 мм [15].

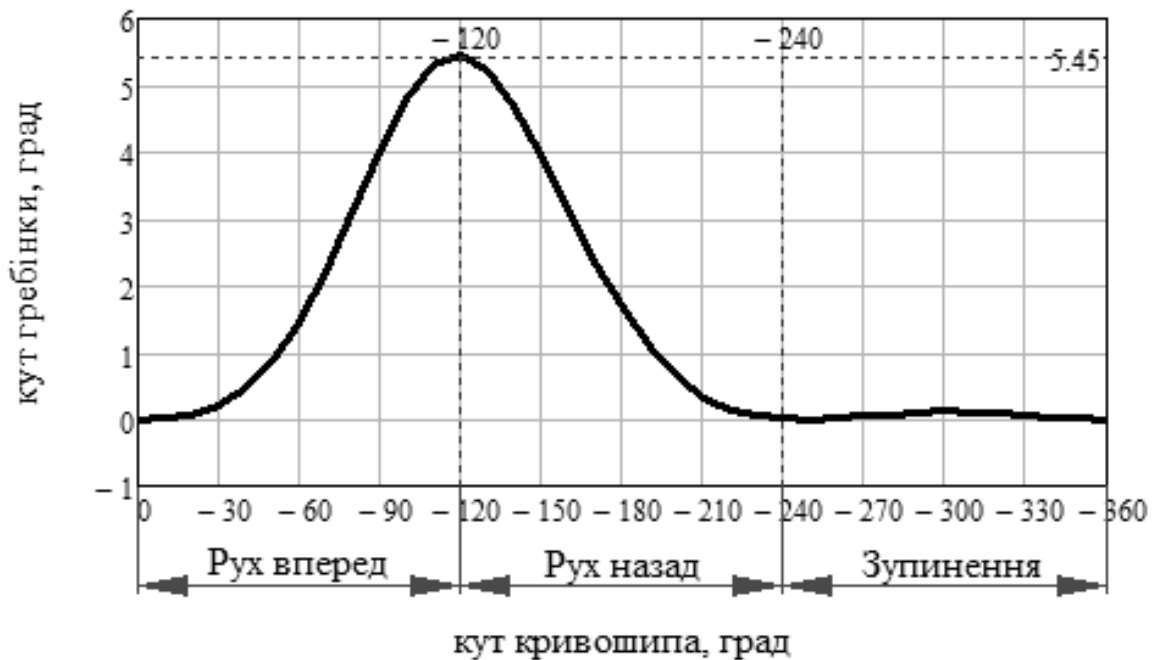


Рис. 2. Графік закону руху гребінки з вушковими голками основов'язальної машини

У результаті проведеного метричного синтезу механізму методом випадкового пошуку були отримані геометричні параметри його ланок, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні параметри ланок механізму

Позначення	L_{1-2}	L_{2-3}	L_{3-4}	L_{2-4}	L_{3-6}	L_{4-5}	L_{7-6}	L_{7-5}	L_{5-6}	L_{7-8}	P_{1X}	P_{1Y}	P_{7X}	P_{7Y}
Значення, мм	25	108	55,5	130	377	458	114	43	146	136,8	0	0	46	533

При метричному синтезі механізму сталими параметрами були прийняті координати стояків ведучого кривошипа та коромисла (відповідно точки P_1 та P_7) та відстань L_{7-8} від осі валу коромисла до робочої точки вушкової голки P_8 . Визначалися лінійні розміри рухомих ланок, що описуються вільними векторами P_{1-2} , P_{2-3} , P_{3-4} , P_{2-4} , P_{3-6} , P_{4-5} , P_{7-6} та P_{5-6} , та здійснювалася ідентифікація складання кінематичної схеми механізму в програмі Mathcad.

При визначенні цільової функції та комп'ютерному моделюванні механізму розв'язувалася задача про визначення положень ланок механізму. Для цього були виділені векторні контури $P_{2-3} \rightarrow P_{3-6} \rightarrow P_{7-2} \leftarrow P_{7-6}$ та $P_{2-4} \rightarrow P_{4-5} \rightarrow P_{7-2} \leftarrow P_{7-5}$ і складені векторні рівняння їхньої замкнутості:

$$\begin{bmatrix} L_{2-3} \cos(\varphi_{2-3}) \\ L_{2-3} \sin(\varphi_{2-3}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{3-6} \cos(\varphi_{3-6}) \\ L_{3-6} \sin(\varphi_{3-6}) \\ 0 \end{bmatrix} + P_{7-2}(\varphi_1) = \begin{bmatrix} L_{7-6} \cos(\varphi_{7-6}) \\ L_{7-6} \sin(\varphi_{7-6}) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} L_{2-4} \cos(\varphi_{2-3} + \alpha_1) \\ L_{2-4} \sin(\varphi_{2-3} + \alpha_1) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{4-5} \cos(\varphi_{4-5}) \\ L_{4-5} \sin(\varphi_{4-5}) \\ 0 \end{bmatrix} + P_{7-2}(\varphi_1) = \begin{bmatrix} L_{7-5} \cos(\varphi_{7-6} + \alpha_2) \\ L_{7-5} \sin(\varphi_{7-6} + \alpha_2) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\text{де } P_{7-2}(\varphi_1) := \begin{bmatrix} P_{1X} + L_{1-2} \cos(\varphi_1) - P_{7X} \\ P_{1Y} + L_{1-2} \sin(\varphi_1) - P_{7Y} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \alpha_1 := -\arccos \left[\frac{L_{2-3}^2 + L_{2-4}^2 - L_{3-4}^2}{2L_{2-3} \cdot L_{2-4}} \right];$$

$$\alpha_2 := \arccos \left[\frac{L_{7-5}^2 + L_{7-6}^2 - L_{5-6}^2}{2L_{7-5} \cdot L_{7-6}} \right].$$

Система векторних рівнянь (1) та (2) розв'язувалася чисельно, з використанням обчислювального блоку Mathcad. Від вибору початкових значень кутів ланок φ_{2-3} , φ_{3-6} , φ_{7-6} та φ_{4-5} залежить варіант складання механізму. Для варіанту складання механізму, що досліджується, були визначені такі значення початкових кутів ланок: $\varphi_{2-3} = 125^\circ$, $\varphi_{3-6} = 80^\circ$, $\varphi_{7-6} = -130^\circ$ та $\varphi_{4-5} = 70^\circ$.

При комп'ютерному моделюванні механізму визначалися радіус-вектори характерних точок механізму через їхні проекції на осі ПСК:

$$P_{2X}(\varphi_1) := P_{1X} + L_{1-2} \cdot \cos(\varphi_1); \quad P_{2Y}(\varphi_1) := P_{1Y} + l_1 \cdot \sin(\varphi_1); \quad (3)$$

$$P_{3X}(\varphi_1) := P_{2X}(\varphi_1) + L_{2-3} \cdot \cos(\varphi_{2-3}(\varphi_1)); \quad P_{3Y}(\varphi_1) := P_{2Y}(\varphi_1) + L_{2-3} \cdot \sin(\varphi_{2-3}(\varphi_1)); \quad (4)$$

$$P_{4X}(\varphi_1) := P_{2X}(\varphi_1) + [\cos(\varphi_{2-3}(\varphi_1)) \cdot \cos(\alpha_1) - \sin(\varphi_{2-3}(\varphi_1)) \cdot \sin(\alpha_1)] \cdot \frac{L_{2-4}}{L_{2-3}}; \quad (5)$$

$$P_{4Y}(\varphi_1) := P_{2Y}(\varphi_1) + [\cos(\varphi_{2-3}(\varphi_1)) \cdot \sin(\alpha_1) + \sin(\varphi_{2-3}(\varphi_1)) \cdot \cos(\alpha_1)] \cdot \frac{L_{2-4}}{L_{2-3}}; \quad (6)$$

$$P_{5X}(\varphi_1) := P_{4X}(\varphi_1) + L_{4-5} \cdot \cos(\varphi_{4-5}(\varphi_1)); \quad P_{5Y}(\varphi_1) := P_{4Y}(\varphi_1) + L_{4-5} \cdot \sin(\varphi_{4-5}(\varphi_1)); \quad (7)$$

$$P_{6X}(\varphi_1) := P_{3X}(\varphi_1) + L_{3-6} \cdot \cos(\varphi_{3-6}(\varphi_1)); \quad P_{6Y}(\varphi_1) := P_{3Y}(\varphi_1) + L_{3-6} \cdot \sin(\varphi_{3-6}(\varphi_1)); \quad (8)$$

та радіус-вектор робочої точки вушкової голки P_8 :

$$P_{8X}(\varphi_1) := P_{7X} + [\cos(\varphi_{7-6}(\varphi_1)) \cdot \cos(\alpha_3) - \sin(\varphi_{7-6}(\varphi_1)) \cdot \sin(\alpha_3)] \cdot \frac{L_{7-8}}{L_{7-6}}; \quad (9)$$

$$P_{8Y}(\varphi_1) := P_{7Y} + [\cos(\varphi_{7-6}(\varphi_1)) \cdot \sin(\alpha_3) + \sin(\varphi_{7-6}(\varphi_1)) \cdot \cos(\alpha_3)] \cdot \frac{L_{7-8}}{L_{7-6}}; \quad (10)$$

де α_3 – кут, який визначає положення робочої точки P_8 відповідно до коромисла P_{7-6} (кут α_3 – це регульований параметр механізму; для розрахунку було прийнято, що $\alpha_3 = 6^\circ$).

Вільні вектори P_{1-2} , P_{2-3} , P_{3-4} , P_{2-4} , P_{3-6} , P_{4-5} , P_{7-6} та P_{5-6} визначалися векторною різницею відповідних радіус-векторів, отриманих за виразами (3)-(10).

Процедура ідентифікації схеми механізму здійснювалася за його комп'ютерній моделі в Mathcad за графіком візуалізації положень ланок механізму (рис. 3, а).

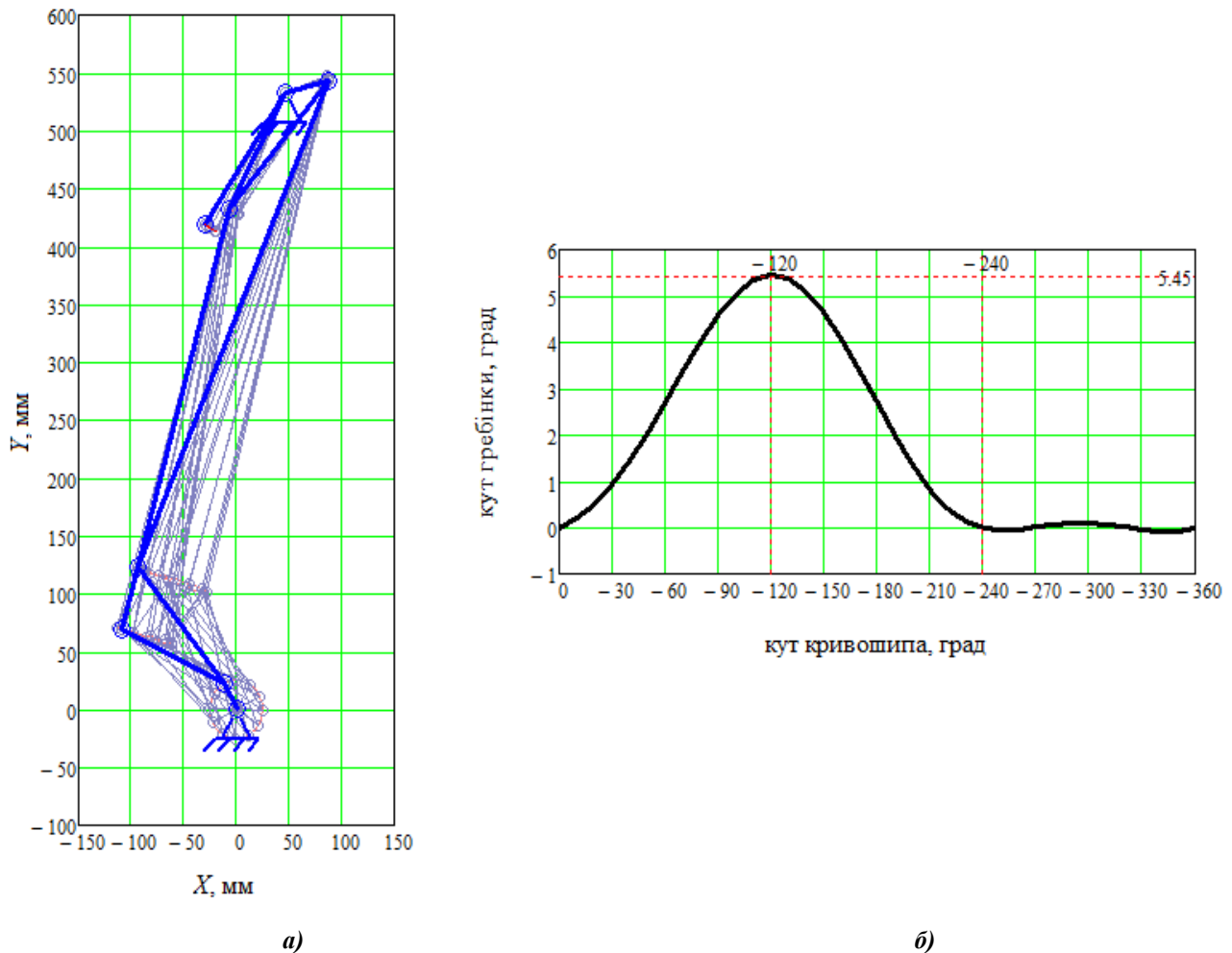


Рис. 3. Графіки: *а* – візуалізації кінематичної схеми суміщеної з 12 положеннями механізму вушкових голок четвертого класу у початковому положенні; *б* – закону руху гребінки з вушковими голками, що реалізується механізмом четвертого класу

Аналіз закону руху робочої точки P_8 вушкової голки за виразами (9)-(10), графік якого представлений на рис. 3, б, показав його співпадіння в границях допустимої похибки із законом руху робочої точки вушкової голки основов'язальної машини ОВ-7 та подібними основов'язальними машинами.

Висновки. Запропонована структура та отримані геометричні параметри плоского шестиланкового механізму, який містить структурні групи четвертого класу другого порядку з обертальними кінематичними парами, що дозволяє при збереженні закону руху вушкової голки із зупинкою за цикл роботи зменшити кількість ланок до п'яти рухомих на відміну від існуючих восьми- та десятиланкових плоских механізмів другого класу та зменшити кількість опорних стояків до двох на відміну від існуючих чотирьох у машині ОВ-7 та трьох у механізмі третього класу зі структурними групами третього класу третього порядку з обертальними кінематичними парами.

Результати можуть використовуватись для проектування та конструювання подібних механізмів в САЕ-програмах та розрахунках кінематики з використанням виразів (3)-(10).

Література

1. Гарбарук В. Н. Проектирование трикотажных машин / В. Н. Гарбарук – Л.: Машиностроение, 1980. – 472 с.
2. Кошель С. О. Структурний аналіз складних механізмів третього та четвертого класів [електронний ресурс] / С. О. Кошель, Г. В. Кошель // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2019. Випуск № 67. С. 64-69.
3. S. Koshel Definition of accelerations of points of a plane mechanism of the fourth class by graph-analytical method / S. Koshel, G. Koshel // Proceedings of Odessa Polytechnic University. Machine building. Process metallurgy. Materials science. – 2018. – № 2(55). P. 28-33.
4. Мацюк И. Н. Исследование плоских стержневых механизмов сложной структуры методами векторной алгебры. [електронний ресурс] / И. Н. Мацюк, Э. М. Шляхов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная механика. – 2015. – № 7 (75). Том 3. – С. 34-38. <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/44236/41479>.
5. Мацюк И. Н. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов высоких классов в программе Mathcad. [електронний ресурс] / И. Н. Мацюк, В. М. Третьяков, Э. М. Шляхов // Теория механизмов и машин. – 2012. – № 1. Том 10. – С. 65-70. – Режим доступа до журн.: <http://tmm.spbstu.ru/journal.html>.
6. Кіницький Я. Т. Аналітичне дослідження кінематики механізмів III класу з використанням системи Mathcad / Я. Т. Кіницький, М. В. Марченко, В. О. Харжевський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 7-10.
7. Осипова О. И. Кинематический анализ и синтез механизмов с шестизвенной четырехповодковой структурной группой и выстоями выходных звеньев : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.18 «Теория механизмов и машин» / О. И. Осипова. – Омск, 2012. – 26 с.
8. Гебель Е. С. Кинематический синтез и анализ кривошипно-ползунных механизмов 3-го класса при заданных циклограмме и положении направляющей [Електронний ресурс] / Е. С. Гебель, В. Г. Хомченко, В. В. Клевакин // Научный журнал НИУ ИТМО. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 2 (24). Режим доступа: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/7413.pdf>.

References

1. Harbaruk V. N. (1980). Proektyrovanie trykotazhnykh mashyn [Planning of knittings machines]. Leningrad: Machine industry [in Russian].
2. Koshel, S. O. & Koshel, H. V. Strukturnyi analiz skladnykh mekhanizmv tretogo ta chetvertogo klasiv [Structural analysis of complex mechanisms of the third and fourth classes]. Lutsk: Naukovi notatky, 67, 64-69 [in Ukrainian].
3. S. Koshel Definition of accelerations of points of a plane mechanism of the fourth class by graph-analytical method / S. Koshel, G. Koshel // Proceedings of Odessa Polytechnic University. Machine building. Process metallurgy. Materials science. – 2018. – № 2(55). P. 28-33.
4. Matsyuk, I. N. & Shlyahov, E. M. (2015). Issledovanie ploskih sterzhnevyyh mehanizmv slozhnoy strukturyi metodami vektornoy algebry [Investigation of flat rod mechanisms with a complex structure by methods of vector algebra]. Eastern European Journal of Advanced Technologies. Applied mechanics, 7(75), V 3, 34-38. Retrieved from: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/44236/41479> [in Russian].
5. Matsyuk, I. N., Tretyakov, V. M. & Shlyahov, E. M. (2012). Kinematicheskii analiz ploskih ryichaznykh mehanizmv vyisokih klassov v programme Mathcad [Kinematic analysis of flat lever mechanisms of high classes in the Mathcad program]. Theory of mechanisms and machines, 1, V 10, 65-70. Retrieved from: <http://tmm.spbstu.ru/journal.html> [in Russian].
6. Kinytskyi, Ya. T., Marchenko, M. V. & Kharzhevskyy, V. O. (2013). Analitichne doslidzhennya kinematyky mekhanizmv III klasu z vykorystanniam systemy Mathcad. [Analytical study of kinematics of mechanisms of the III class using the system Mathcad]. Khmelnytsky: KhNU. Tekhnichni nauky, 6, 7-10 [in Ukrainian].
7. Osipova, O. I. (2012). Kinematicheskii analiz i sintez mekhanizmv s shestizvennoi chetyrekhpodkovkoi strukturnoi gruppoy i vystoiami vykhodnykh zvenev. [Kinematic analysis and synthesis of mechanisms with a six-link four-link group structural group and endurance of the output links: author. dis. on the science]. Omsk [in Russian].
8. Gebel, E. S. (2015). Kinematicheskij sintez i analiz krivoshipno-polzunnykh mehanizmv 3-go klassa pri zadannykh ciklogramme i polozhenii napravlyayushej [Kinematic synthesis and analysis of crank-slider mechanisms of the 3rd class with a given cycle diagram and position of the guide]. Scientific journal of NRU ITMO. Processes and apparatus for food production, 2 (24). Retrieved from: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/7413.pdf>.
9. Dvorzhak, V. M., Orlovskyy, B. V., Petriv, B. M. &

9. Дворжак В. М. Схемотехнічне моделювання механізмів основов'язальних машин зі структурними групами III класу. Повідомлення 1. [електронний ресурс] / В. М. Дворжак, Б. В. Орловський, Б. М. Петрів, М. Г. Залиубовський // Технології та дизайн. 2012. № 4. Режим доступу до журн.: http://archive.nbuv.gov.ua/e-journal_s/td/2012_4/index.html.
10. Дворжак В. М. Схемотехнічне моделювання механізмів основов'язальних машин зі структурними групами III класу. Повідомлення 2. [електронний ресурс] / В. М. Дворжак, Б. В. Орловський, Б. М. Петрів, М. Г. Залиубовський // Технології та дизайн. – 2013. – № 2. Режим доступу до журн.: http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/td/2013_2/index.html.
11. Орловський Б. В. Схемотехнічне моделювання механізмів основов'язальних машин з трьома ступенями вільності зі структурними групами III класу IV порядку / Б. В. Орловський, В. М. Дворжак, І. В. Савченко Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 3. – С. 174-181.
12. Дворжак В. М. Комп'ютерне моделювання механізмів основов'язальних машин зі структурними групами третього класу третього порядку з поступальними парами / В. М. Дворжак // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. – 2015. – № 6. – С. 37-46.
13. Дворжак В. М. Математичне моделювання механізмів швейних машин зі структурними групами третього класу третього порядку з двома поступальними парами / В. М. Дворжак Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. – 2016. – № 5. – С. 99-108.
14. Дворжак В. М. Силовий аналіз механізму коливального руху вушкових голок основов'язальної машини / В. М. Дворжак // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. – 2019. – № 3 (134). – С. 26-35.
15. Дворжак В. М. Удосконалення та синтез механізму прокачки вушкових голок основов'язальних машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.10 «Машини легкої промисловості» / В. М. Дворжак. – Київ, 2008. – 26 с.
- Zaliubovskyi, M. H. (2012). Skhemotekhnichne modeliuvannia mekhanizmiv osnovoviazalnykh mashyn zi strukturnymy hrupamy III klasu. Povidomlennia 1. [Circuit modeling of the mechanisms of warp machines with third-class structural groups. Priority 1]. Kyiv: Tekhnolohiyi ta dyzayn, 4. Retrieved from: http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/td/2012_4/index.html [in Ukrainian].
10. Dvorzhak, V. M., Orlovskyy, B. V., Petriv, B. M. & Zaliubovskyi, M. H. (2013). Skhemotekhnichne modeliuvannia mekhanizmiv osnovoviazalnykh mashyn zi strukturnymy hrupamy III klasu. Povidomlennia 2. [Circuit modeling of the mechanisms of warp machines with third-class structural groups. Priority 2]. Kyiv: Tekhnolohiyi ta dyzayn, 2. Retrieved from: http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/td/2013_2/index.html [in Ukrainian].
11. Orlovskyy, B. V., Dvorzhak, V. M. & Savchenko, I. V. (2013). Skhemotekhnichne modeliuvannia mekhanizmiv osnovoviazalnykh mashyn z troma stupeniamy vilnosti zi strukturnymy hrupamy III klasu IV poriadku. [Schematic modeling of the mechanisms of three-degree-knotting machines with fourth-order third-class structural groups]. Khmelnytsky: KhNU. Tekhnichni nauky, 3, 174-181 [in Ukrainian].
12. Dvorzhak, V. M. (2015). Kompiuterne modeliuvannia mekhanizmiv osnovoviazalnykh mashyn zi strukturnymy hrupamy tretogo klasu tretogo poriadku z postupalnymi paramy [Computer modeling of mechanisms of warp knitting machines with structural groups of the third class of the third order with translational pairs]. Kyiv: Visnyk KNUTD. Tekhnichni nauky, 6, 37-46 [in Ukrainian].
13. Dvorzhak, V. M. (2016). Matematychnе modeliuvannia mekhanizmiv shveinykh mashyn zi strukturnymy hrupamy tretogo klasu tretogo poriadku z dvoma postupalnymi paramy [Mathematical modeling of sewing machines with structural groups of the third class of the third order with two translational pairs]. Kyiv: Visnyk KNUTD. Tekhnichni nauky, 5, 99-108 [in Ukrainian].
14. Dvorzhak, V. M. (2019). Sylovyi analiz mekhanizmu kolyvalnoho rukhu vushkovykh holok osnovoviazalnoi mashyny [Power analysis of the mechanism of oscillating movement of the eye needles of the warp knitting machine]. Kyiv: Visnyk KNUTD. Tekhnichni nauky, 3 (134), 26-35 [in Ukrainian].
15. Dvorzhak, V. M. (2008). Udoskonalennia ta syntezy mekhanizmu prokachky vushkovykh holok osnovoviazalnykh mashyn. [Improvement and synthesis of the mechanism of oscillating movement of eyelets of basic knitting machines]. Kyiv [in Ukrainian].

VOLODYMYR DVORZHAK

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-9106>

ResearcherID: P-5907-2018

Docent of the Department of Applied Mechanics and Machines,
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Docent, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ЧЕТВЕРТОГО КЛАССА ДЛЯ ПРИВОДА УШКОВЫХ ИГЛ ОСНОВОВЯЗАЛЬНОЙ МАШИНЫ

ДВОРЖАК В. М.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработка и исследование функционально-адекватных целевых механизмов технологических машин лёгкой промышленности с применением прикладных САЕ-программ.

Методика. Использованы аппарат векторной алгебры; аналитический и численный методы определения функций положения плоских механизмов, содержащих структурную группу четвертого класса второго порядка, на основе векторного преобразования координат; метод случайного поиска для метрического синтеза плоских механизмов; методы компьютерной визуализации и анимации кинематических схем плоских механизмов высоких классов.

Результаты. Получены математические модели, описывающие функции положения механизма ушковых игл основовязальной машины, содержащий структурную группу четвертого класса второго порядка с вращательными кинематическими парами, в виде углов подвижных звеньев, свободных векторов, построенных на этих звеньях, и радиус-векторов характерных точек механизма в функции угла поворота ведущего кривошипа. Определены геометрические параметры плоского шестизвенного механизма ушковых игл для основовязальной машины, содержащий структурную группу четвертого класса второго порядка с вращательными кинематическими парами в результате метрического синтеза механизма методом случайного поиска в САЕ-программе; выполнено компьютерное схемотехническое моделирование полученного механизма; построены графики визуализации и анимации кинематической схемы полученного механизма; проведена идентификация сборки кинематической схемы полученного механизма на предмет соответствия принятой структуре; получен график функции положения ушковой иглы механизма четвертого класса; выполнено сравнение функций положения ушковой иглы нового механизма и механизма основовязальной машины ОВ-7.

Научная новизна. Предложена структура плоского шестизвенного механизма, содержащего структурные группы четвертого класса второго порядка с вращательными кинематическими парами, для применения в качестве приводного в основовязальной машине на примере механизма колебательного движения ушковых игл. Определены геометрические размеры подвижных звеньев функционально-адекватного механизма четвертого класса для привода ушковых игл основовязальной машины. Созданы программные блоки для автоматизированного компьютерного метрического синтеза и расчета углов звеньев и радиус-векторов характерных точек механизма в САЕ-программе.

Практическая значимость работы заключается в использовании полученных результатов для проектирования и конструирования плоских механизмов четвертого класса с вращательными кинематическими парами основовязальных машин, в которых рабочие органы осуществляют остановки при выполнении рабочего процесса.

Ключевые слова: механизм четвертого класса, структурная группа четвертого класса, механизм ушковых игл, основовязальная машина.

APPLICATION OF THE FOURTH CLASS MECHANISM FOR DRIVE EAR NEEDLES OF THE BASIC BINDING MACHINE

DVORZHAK V. M.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Development and research of functionally-adequate target mechanisms of technological machines of light industry with application of applied CAE-programs.

Methodology. Used the apparatus of vector algebra; analytical and numerical methods for determining the position functions of planar mechanisms containing a structural group of the fourth class of the second order, based on the vector transformation of coordinates; random search method for metric synthesis of flat mechanisms; methods of computer visualization and animation of kinematic schemes of flat mechanisms of higher classes.

Findings. Mathematical models describing the position functions of the mechanism of eyelets of a warp knitting machine containing a structural group of the fourth class of the second order with rotating kinematic pairs in the form of angles of moving links, free vectors constructed on these links and radius vectors of characteristic points of the mechanism as a function of the angle of rotation of the master crank. The geometrical parameters of the flat six-link mechanism of eyelets for the warp knitting machine containing the structural group of the fourth class of the second order with rotating kinematic pairs as a result of metric synthesis of the mechanism by random search in CAE-program are determined; computer circuit modeling of the obtained mechanism is performed; graphs of visualization and animation of the kinematic scheme of the received mechanism are constructed; identification of the kinematic scheme of the obtained mechanism for compliance with the accepted structure; the received graph of function of position of an auricular needle of the mechanism of the fourth class; the functions of the position of the eye needle of the new mechanism and the mechanism of the basic knitting machine OV-7 are compared.

Originality. The structure of a flat six-link mechanism, containing structural groups of the fourth class of the second order with rotating kinematic pairs, is proposed for use as a drive in a warp knitting machine on the example of the mechanism of oscillating movement of eyelets. The geometric dimensions of the moving parts of the functionally adequate mechanism of the fourth class for the drive of the eye needles of the basic knitting machine are determined. Software blocks for automated computer metric synthesis and calculation of link angles and radius vectors of characteristic points of the mechanism in the CAE program have been created..

Practical Value is to use the results for the design and construction of flat mechanisms of the fourth class with rotating kinematic pairs of warp knitting machines, in which the working bodies make stops during the work process.

Keywords: fourth class mechanism, fourth class structural group, eye needle mechanism, basic knitting machine.

УДК 621.924.7 **ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г.¹, ПАНАСЮК І. В.², МАЛИШЕВ В. В.¹**

¹Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

²Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З ДВОМА ЄМКОСТЯМИ, ЩО ВИКОНУЮТЬ СКЛАДНИЙ ПРОСТОРОВИЙ РУХ

Мета. Дослідження основних кінематичних параметрів галтувальної машини з двома рухомими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою та виконують складний просторовий рух для можливості подальшого прогнозування технологічного результату на стадії проектування такого обладнання та відповідних технологічних операцій обробки деталей.

Методика. Із застосуванням системи автоматизованого проектування SolidWorks-2016 Motion проведено 3D моделювання, з подальшим виконанням кінематичного аналізу, машини для обробки деталей з двома рухомими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою та виконують складний просторовий рух. Суть кінематичного аналізу полягала у визначенні лінійних швидкостей та прискорень точок, що співпадають з торцями робочих ємкостей машини.

Результати. На основі 3D моделювання та кінематичного аналізу в системі автоматизованого проектування SolidWorks-2016 Motion визначено деякі кінематичні параметри машини, зокрема, у вигляді графічних залежностей отримано закон зміни кутової швидкості веденого валу машини, досліджено зміну поступальної швидкості та поступального прискорення чотирьох точок, які умовно розташовані в центрі торців кожної з робочих ємкостей.

Наукова новизна. Встановлено взаємозв'язок між деякими кінематичними параметрами (лінійна швидкість та лінійне прискорення) розробленої конструкції машини з двома рухомими ємкостями, що виконують складний просторовий рух.

Практична значимість. Встановлено, що кінематичні параметри двох ємкостей машини відрізняються між собою, в результаті чого, під час виконання відповідних технологічних операцій, інтенсивність переміщення робочого масиву у двох ємкостях відрізнятиметься між собою. Окрім того, торці кожної з робочих ємкостей переміщуються практично з однаковими кінематичними параметрами, що сприятиме переміщенню робочого масиву між протилежними торцями обох ємкостей в зустрічних напрямках з однаковою інтенсивністю. Отримані результати дають можливість визначити найбільш раціональне функціональне призначення досліджуваної машини.

Ключові слова: складний просторовий рух, робоча ємкість, кінематичні параметри, поступальне прискорення, поступальна швидкість.

Вступ. Окремим типом механічної обробки деталей є об'ємні галтувальні технологічні операції [1]. Вони реалізуються при обробці деталей технологічним середовищем в рухомих робочих ємкостях. Таким способом виготовляються ті деталі, які неможливо обробити із застосуванням універсальних пристроїв (токарних, фрезерувальних, свердлильних та інших верстатів), а також деталі, для яких відсутні вимоги щодо зняття точно визначеної величини припуску з їх оброблюваної поверхні.

Зокрема, до таких технологічних операцій відносяться: технологічні процеси покращення якості поверхні деталей (шліфування [2] та полірування [3]); відділення деталей від ливників [4]; подрібнення; очищення поверхні деталей від продуктів корозії, заусенцій, облою та окалин; заокруглення гострих країв тощо.

Для реалізації таких технологічних операцій використовують різні типи галтувального обладнання. Найбільш поширеними є обертові ємкості [5] різної конструкції, а також вібраційні машини [6]. Однак, таке обладнання є найменш ефективним, на обробку

деталей витрачається значний резерв часу (до 38 годин безперервної роботи машини), а величина припуску, яку можна зняти з поверхні деталі за допомогою вібраційної установки не перевищує 0,025 мм. Використовуються також шпиндельні, шіткові та роторні машини. Перспективним, на сьогоднішній день, вважається використання галтувального обладнання з ємкостями, які виконують складний просторовий рух [7, 8]. В таких машинах робоча ємкість виконує одночасне переміщення відносно трьох взаємно перпендикулярних площин, а також обертається навколо власної осі. Такий рух робочої ємкості сприяє підвищенню інтенсивності руху технологічного середовища. Оброблювані деталі отримують усі ступені свободи, їх багаточисельні зіткнення з абразивним наповнювачем відбуваються одночасно з усіх боків, таким чином, уся поверхня виробів оброблюється рівномірно. В результаті чого можна досягнути значного підвищення продуктивності виготовлення деталей з одночасним зменшенням енерговитрат.

Постановка завдання. Авторами розроблені різноманітні конструкції машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, які мають свою специфіку та використовуються для відповідних різних технологічних операцій.

Конструкція машини зі складним рухом робочої ємкості [9], яку рекомендовано використовувати виключно для процесів відділення деталей від ливників. Розроблено та досліджено ряд конструкцій [10 – 14], в кінематичних ланцюгах яких відсутня наявність надлишкового (пасивного) зв'язку. Відомо [15], що у деяких машинах зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, протилежні торці робочої ємкості рухаються з різними кінематичними характеристиками, у зв'язку з цим переміщення технологічного середовища між торцями робочої ємкості у зустрічних напрямках відбувається з різною інтенсивністю. Таким чином, були розроблені конструкції машин [16, 17], у яких, за рахунок використання спеціальних конструкцій приводів, збалансовано кінематичні характеристики переміщення протилежних торців робочої ємкості. Такі конструкції машин рекомендовано використовувати для процесів покращення якості поверхні деталей (шліфування та полірування).

Також розроблена [18] конструкція машини з двома ємкостями, що виконують складний просторовий рух та рухомо з'єднані між собою за допомогою поступальної кінематичної пари. В результаті рухомого з'єднання двох ємкостей між собою поступальною кінематичною парою буде збільшуватися амплітуда просторового переміщення кожної із ємкостей. Базуючись на висновки деяких попередніх досліджень [15], ймовірно, що дві робочі ємкості будуть виконувати просторове переміщення з різною інтенсивністю. Однак, дослідження кінематичних параметрів такої конструкції машини до тепер не проводилися.

Таким чином, дослідження кінематичних параметрів конструкції машини з двома ємкостями, що виконують складний просторовий рух та рухомо з'єднані між собою за допомогою поступальної кінематичної пари є актуальною задачею на сьогоднішній день. Дані дослідження дадуть можливість отримати інформації щодо характеру руху кожної з двох робочих ємкостей, а також дадуть можливість прогнозувати технологічний результат на стадії проектування,

Результати дослідження. Авторами розроблено конструкцію галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що рухомо з'єднані між собою за допомогою поступальної

кінематичної пари. Обидві ємкості виконують складний просторовий рух. В результаті використання двох рухомих робочих ємкостей з кінематичного ланцюга машини виключено надлишковий зв'язок. На рис. 1, а представлено кінематичну схему машини.

Для проведення подальшого кінематичного дослідження машини за допомогою САПР SolidWorks було виконано моделювання даної конструкції машини з наступними геометричними параметрами: відстань між осями обертання ведучого та веденого валів $l_0=0,24$ м, міжосьова відстань вилок $l_B=0,077$ м, зовнішній діаметр робочих ємкостей $d=0,1$ м, довжина робочих ємкостей від осі обертальної кінематичної пари з'єднання з вилкою до протилежного торця $l_{PE}=0,019$ м, об'єм робочої ємкості $V_{PE}=0,0015$ м³ (1,5 л). Модель машини, що виконана в САПР SolidWorks представлено на рис. 1, б (позначення на рис. 1, б співпадають з позначенням ланок на кінематичній схемі, яка представлена на рис. 1, а).

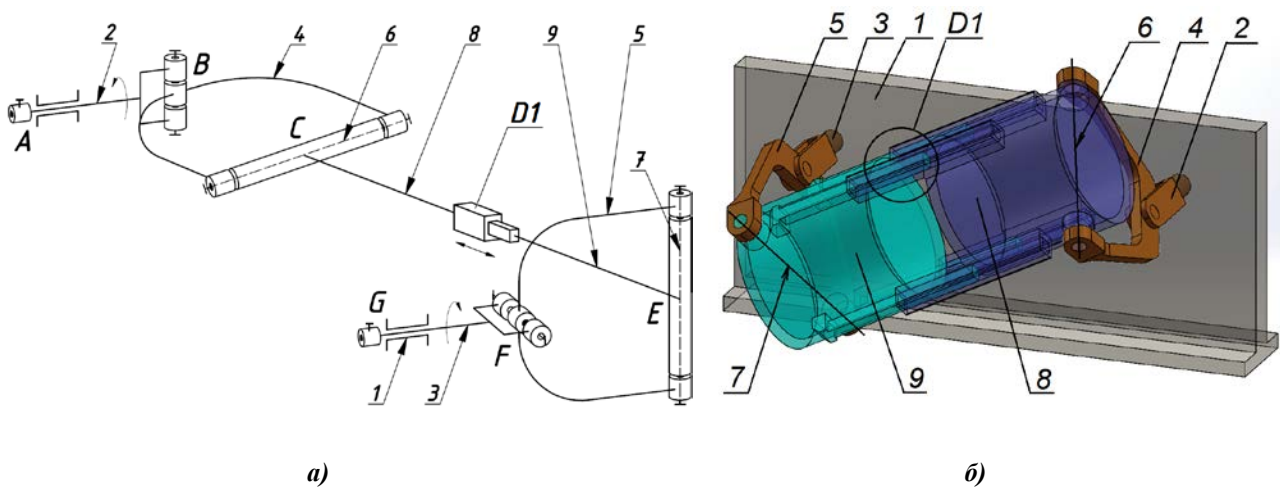


Рис. 1. Кінематична схема машини з двома рухомими робочими ємкостями (а) та модель даної машини, виконана в САПР SolidWorks (б)

Машина містить станину 1, ведучий 2 та ведений 3 вали, що встановлені в станині паралельно в одній площині. Ведучий 2 та ведений 3 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучою 4 та веденою вилкою 5 відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні геометричні осі 6 та 7 яких є вісями кріплення робочих ємкостей 8 та 9 відповідно. Робочі ємкості 8 та 9 з'єднані між собою за допомогою поступальної кінематичної пари $D1$.

Машина з поступальною кінематичною парою працює наступним чином: обертальний рух від приводу машини передається на ведучий вал 2, який передає обертальний рух ведучій вилці 4, котра через вісь 6 обертає першу робочу ємкість 8. Обертальний рух робочої ємкості 8 через поступальну кінематичну пару $D1$ передається до робочої ємкості 9. Обертальний рух робочої ємкості 9 передається через вісь 7 на вилку 5 та на ведений вал 3. Робочі ємкості 8 та 9 виконують складний просторовий рух у трьох взаємно перпендикулярних площинах, а також виконують зворотно-поступальне переміщення одна відносно іншої. За один оберт ведучого валу 2, робочі ємкості 8 та 9 виконують вісім вздовжосьових зворотно-поступальних переміщень одна відносно іншої.

В даній конструкції машини, що, зі структурної точки зору, являє собою подвійний просторовий шарнір, ведучий вал обертається з постійною кутовою швидкістю. Як відомо з роботи [15], обертання ведучого валу в подвійному просторовому карданному шарнірі призводить до того, що ведений вал обертається з непостійною кутовою швидкістю та призводить до більш інтенсивного переміщення частини робочої ємкості, яка з'єднана з веденим валом.

Таким чином, у САПР SolidWorks Motion було проведено кінематичне дослідження щодо визначення характеру обертання веденого валу машини. При проведенні даного дослідження ведучому валу було задано обертання з постійною кутовою швидкістю в $\omega_{ведуч.} = 4,2 \text{ рад/с}$. У попередніх дослідженнях [19] було встановлено, що для даного типорозміру машини така кутова швидкість ведучого валу $\omega_{ведуч.}$ є раціональною для забезпечення виконання основних гальтувальних операцій із забезпеченням їх високої продуктивності. За кут повороту ведучого валу, який рівний нулю градусів, прийнято таке положення рухомих ланок машини, при якому вісь кріплення ведучої вилки з робочою ємкістю є горизонтальною. Результати даного кінематичного дослідження у вигляді графічної залежності зміни кутової швидкості веденого валу $\omega_{вед.}$ При постійній кутовій швидкості ведучого валу $\omega_{ведуч.}$ Від кута повороту ведучого валу представлені на рис. 2.

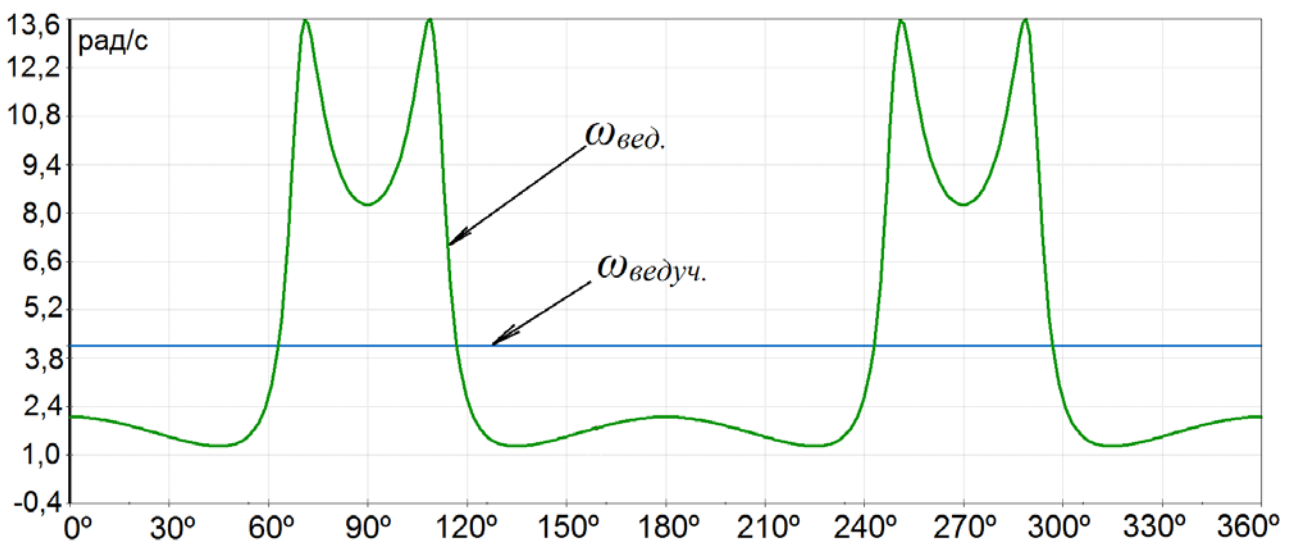


Рис. 2. Графічна залежність зміни кутової швидкості веденого валу $\omega_{вед.}$ При постійній кутовій швидкості ведучого валу $\omega_{ведуч.}$ Від кута повороту ведучого валу

Кутова швидкість $\omega_{вед.}$ Веденого валу даної машини буде непостійною та змінюватиметься в діапазоні від 1,4 до 13,6 рад/с. Також було підтверджено, що значення кутових швидкостей не залежать від пропорційної зміни геометричних розмірів ланок механізму, від так дана залежність зміни кутової швидкості веденого валу $\omega_{вед.}$ При постійній кутовій швидкості ведучого валу $\omega_{ведуч.}$ Від кута повороту ведучого валу буде справедливою для будь-якого типорозміру даної машини.

Непостійна кутова швидкість обертання веденого валу спричинятиме рух двох робочих ємкостей з різною інтенсивністю. Ймовірно, що робоча ємкість, яка з'єднана з

веденою вилкою буде рухатися інтенсивніше ніж робоча ємкість, яка з'єднана з ведучою вилкою. Для того, щоб зрозуміти у скільки разів кінематичні параметри переміщення однієї ємкості будуть більші за кінематичні параметри переміщення іншої ємкості, було проведено подальше кінематичне дослідження моделі вищеописаної машини у САПР SolidWorks.

Просторовий рух робочих ємкостей складається з чотирьох простих складових рухів, а саме: за один оберт ведучого валу відбувається один повний поворот обох робочих ємкостей навколо їх повздовжньої осі, а також переміщення в кожній з трьох взаємно перпендикулярних площинах: горизонтальній, вертикальній та профільній.

З попередніх досліджень відомо [20], що інтенсивність та зміна режимів руху технологічного середовища в середній робочій ємкості залежить від максимального значення прискорень точок, які співпадають з центрами торців робочої ємкості. В результаті цього досліджували кінематичні параметри (поступальну швидкість та поступальне прискорення) чотирьох точок, які співпадають з центрами торців кожної з ємкостей: точка A розташована в центрі торця робочої ємкості, яка з'єднана з ведучою вилкою, точка B – в центрі протилежного торця, точка D – в центрі торця робочої ємкості, яка з'єднана з веденою вилкою, точка C – в центрі протилежного торця даної ємкості. Для визначення кінематичних параметрів визначених точок на моделі машини було виділено дві нерухомі системи координат $X_A Y_A Z_A$ та $X_B Y_B Z_B$ відносно яких визначали відповідні кінематичні параметри. Модель машини з позначеними точками на робочих ємкостях, а також дві нерухомі системи координат $X_A Y_A Z_A$ та $X_B Y_B Z_B$ представлено на рис. 3.

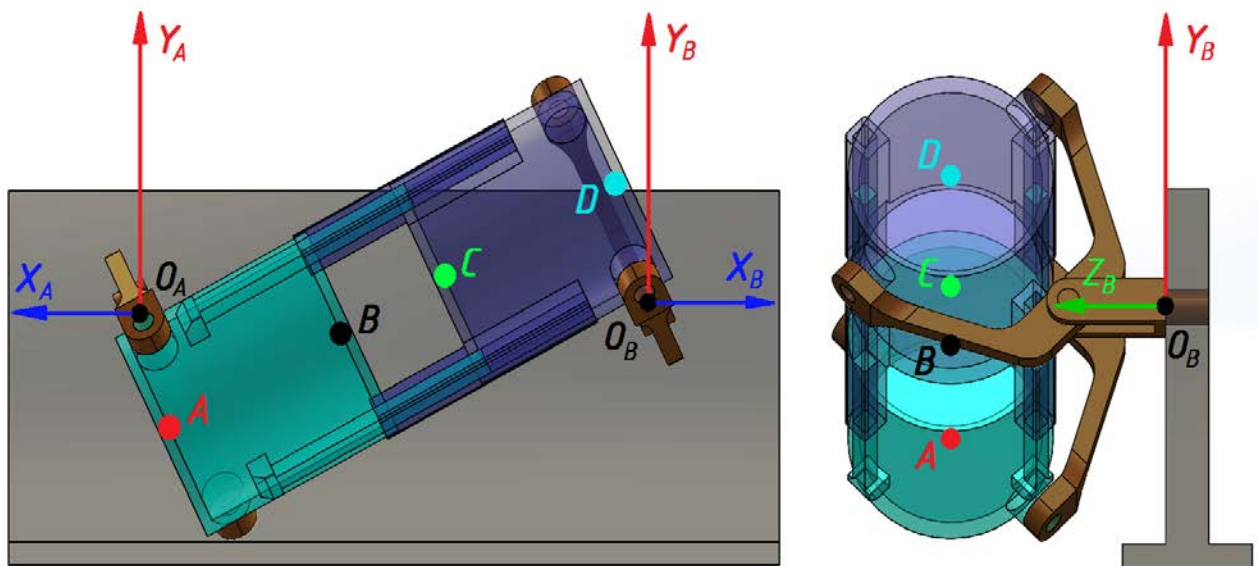


Рис. 3. Модель машини з позначеними точками на робочих ємкостях та двома нерухомими системами координат $X_A Y_A Z_A$ та $X_B Y_B Z_B$

Далі визначали та порівнювали між собою складові поступальної швидкості й поступального прискорення точок A , B , C та D . На рис. 4 представлено залежність зміни складових поступальних швидкостей точок A , B , C та D , які визначені на робочих ємкостях машини від кута повороту ведучого валу, а на рис 5. Представлено залежність зміни

складових поступальних прискорень точок A , B , C та D , які визначені на робочих ємкостях машини від кута повороту ведучого валу.

Після аналізу графіків, які представлені на рис. 4 та рис. 5 було зроблено наступні висновки. На відміну від кінематичних характеристик машини зі однією робочою ємкістю, які представлені в роботі [15], де поступальна швидкість та поступальне прискорення точок за один оберт ведучого валу мають дві фази зміни, в досліджуваній конструкції машини з двома робочими ємкостями поступальна швидкість та поступальне прискорення кожної з точок, що визначені на робочих ємкостях, за один оберт ведучого валу, будуть мати по чотири фази зміни, дві з яких будуть більш виражені. Це свідчить про те, що робочий масив під час виконання відповідних технологічних операцій, буде більш інтенсивно струшуватися, що сприятиме підвищенню продуктивності виконання обробки деталей.

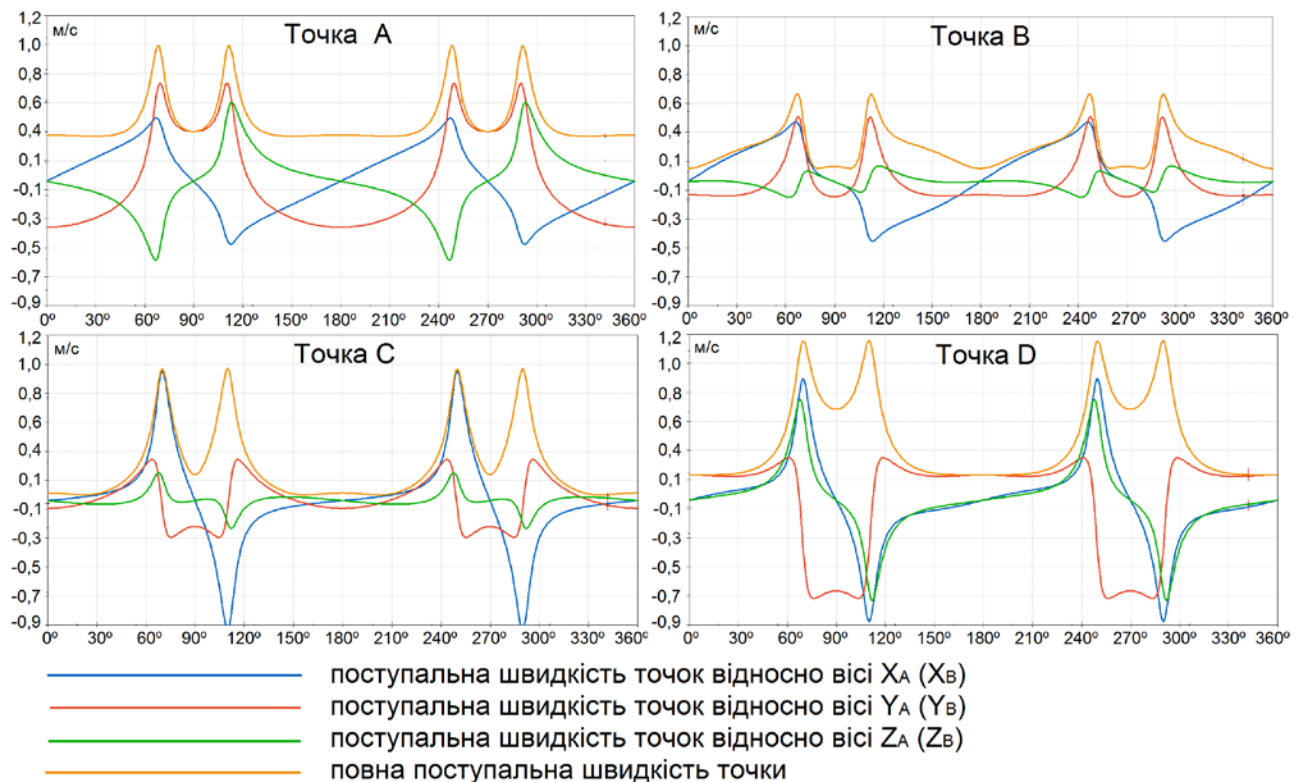


Рис. 4. Залежність зміни складових поступальних швидкостей точок, які визначені на робочих ємкостях машини від кута повороту ведучого валу

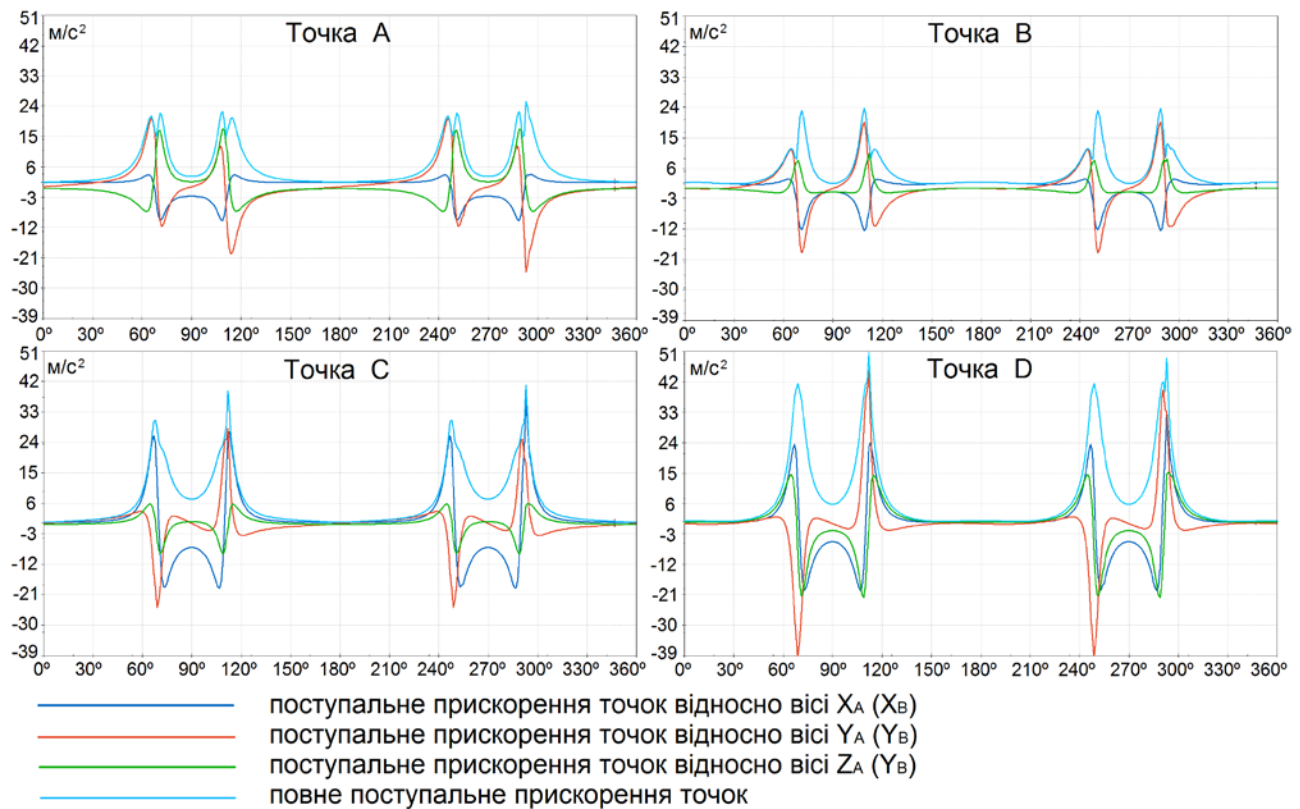


Рис. 5. Залежність зміни складових поступальних прискорень точок, які визначені на робочих ємкостях машини від кута повороту ведучого валу

При порівнянні кінематичних характеристик точок двох робочих ємкостей, очевидно, що кінематичні параметри поступальної швидкості та поступального прискорення точок *C* та *D* робочої ємкості, яка з'єднана з веденою вилкою будуть мати дещо більші екстремальні та амплітудні значення за кінематичні характеристики точок *A* та *B* робочої ємкості, яка з'єднана з ведучою вилкою. Так, наприклад, повне поступальне прискорення точки *D* буде змінюватися в діапазоні від 1 до 51 м/с² всього лиш за 30° повороту ведучого валу, на відміну від повного прискорення точки *A*, діапазон зміни якого буде в межах 2 – 22 м/с² відбуватиметься приблизно за 45° повороту ведучого валу. В цілому, максимальні та амплітудні значення кінематичних параметрів робочої ємкості, що з'єднана з веденою вилкою будуть в 1,5 – 2 рази більші за відповідні значення кінематичних параметрів робочої ємкості, яка з'єднана з ведучою вилкою. Було перевірено, що приблизно така само різниця між кінематичними параметрами обох ємкостей буде зберігатися й при заданні іншої кутової швидкості обертання ведучого валу машини. Різниця в кінематичних параметрах обох ємкостей зумовлена нерівномірним обертанням веденого валу машини.

Кінематичні параметри робочих ємкостей, зокрема, зміна поступального прискорення безпосередньо впливають на інтенсивність руху робочого масиву в середині робочих ємкостей під час виконання відповідних технологічних операцій. Таким чином, інтенсивність переміщення робочого масиву в ємкості, що з'єднана з веденою вилкою буде більша за інтенсивність переміщення робочого масиву в ємкості, що з'єднана з ведучою вилкою. Від

так, й час, що витрачається на виконання відповідної технологічної операції буде різним для обох рухомих робочих ємкостей.

На відміну від «базової» конструкції машини [7, 8], де кінематичні параметри точок протилежних торців робочої ємкості відрізняються між собою в декілька разів, кінематичні параметри точок протилежних торців робочих ємкостей досліджуваної конструкції машини відрізняються між собою на незначну величину. Наприклад, крива зміни поступальної швидкості точок A та B робочої ємкості, яка з'єднана з ведучою вилкою, а також крива зміни поступальної швидкості точок C та D робочої ємкості, яка з'єднана з веденою вилкою повністю співпадають між собою. Аналогічно, співпадають між собою криві повного поступального прискорення точок A та B . Екстремальні значення повного поступального прискорення точок C та D відрізняються між собою на відносно незначну величину – приблизно 10 м/с^2 .

Оскільки кінематичні параметри протилежних торців обох робочих ємкостей майже не відрізняються між собою, то це сприятиме переміщенню робочого масиву між протилежними торцями обох ємкостей в зустрічних напрямках з однаковою інтенсивністю. В результаті чого можна забезпечити реалізацію однакового режиму руху робочого масиву при незмінній постійній кутовій швидкості ведучого валу упродовж усього процесу виконання відповідної технологічної операції.

При порівнянні кінематичних параметрів кожної з визначених на робочих ємкостях точок, очевидно, що найбільша амплітуда зміни поступального прискорення кожної з точок буде при переміщенні їх вздовж вертикальних осей Y_A та Y_B , найменша – при переміщенні їх вздовж осей Z_A та Z_B . Окрім того, торці робочої ємкості, яка з'єднана з веденою вилкою, будуть мати значні кінематичні параметри при переміщенні вздовж горизонтальної осі X_A та X_B , що зумовлено виникненням додаткової складової руху, яка виникає при поступальному переміщенні обох ємкостей одна відносно іншої.

За допомогою проведеного кінематичного дослідження конструкції галтувальної машини з двома рухомими робочими ємкостями, що виконують складний просторовий рух, що виконане за допомогою САПР SolidWorks Motion, досліджено основні кінематичні параметри просторового переміщення обох ємкостей, що в подальшому дають можливість раціонально проектувати відповідні технологічні процеси.

Висновки:

1. Із застосуванням САПР SolidWorks Motion проведено 3D моделювання з подальшим дослідженням основних кінематичних параметрів галтувальної машини з двома рухомими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою та виконують складний просторовий рух для можливості подальшого прогнозування технологічного результату на стадії проектування.

2. Встановлено, що кінематичні параметри двох ємкостей відрізняються між собою, зокрема, інтенсивність переміщення робочого масиву в ємкості, що з'єднана з веденою вилкою буде більша за інтенсивність переміщення робочого масиву в ємкості, що з'єднана з ведучою вилкою. В результаті чого, під час виконання відповідних технологічних операцій, інтенсивність переміщення робочого масиву у двох ємкостях відрізнятиметься між собою.

3. Встановлено, що торці кожної з робочих ємкостей переміщуються практично з однаковими кінематичними параметрами. Це буде забезпечувати переміщення робочого масиву між протилежними торцями обох ємкостей в зустрічних напрямках з однаковою інтенсивністю та реалізацію однакового режиму руху робочого масиву при незмінній постійній кутовій швидкості ведучого валу упродовж усього процесу виконання відповідної технологічної операції.

ZALIUBOVSKIY MARK

markzalubovskiy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6258-0088>
Open University of Human Development «Ukraine»

IGOR PANASYUK

panasjuk1961@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>
ResearcherID: D-4255-2017
Kyiv National University of Technologies & Design

MALYSHEV VICTOR

viktor.malyshev.igic@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2756-3236>
Open University of Human Development «Ukraine»

Література

1. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / Під заг. ред. В.П. Коновала. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – 255 с;
2. Патент №113267, МПК В24В 31/10 (2006.01). Спосіб вологого шліфування полімерних деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201606526; заяв. 15.06.2016, опуб. 25.01.2017, бюл. № 2;
3. Патент №113266, МПК В24В 31/10 (2006.01). Спосіб вологого полірування полімерних деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201606525; заяв. 15.06.2016, опуб. 25.01.2017, бюл. № 2;
4. Патент №137568, МПК В24В 31/10 (2006.01). Спосіб об'ємної обробки металевих деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Сухенко А.Г., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201904193; заяв. 19.04.2019, опуб. 25.10.2019, бюл. № 20;
5. Пат. України 38253, МПК В24В 31/033. Спосіб об'ємної обробки поверхні деталі / Буря О.І., Фасатунов С.С., Кобець А.С., Деркач О. Д., заявник та патентовласник Дніпропетровський державний аграрний університет – №u2000063429; заяв. 12.06.2000, опуб. 15.05.2001, бюл. № 4/2001;
6. Шумакова Т. А. Инструмент для виброабразивной обработки деталей: монография / Т. А. Шумакова, В. И. Шаповалов, Ю. И. Гутько;

References

1. Zalyubovskiy, M., Panasyuk, I., & Malyshev V. (2007). Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei: monohrafiia [Machines with complex movement of working capacities for processing of polymer parts]. Kyiv [in Ukraine];
2. Pershin, V., Odnolko, V., & Pershina, S. (2009). Pererabotka sypuchykh materialov v mashinakh barabannogo tipa [Processing bulk materials in drum type machines]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian];
3. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, Sukhenko AH, inventors (2019). Sposib ob'iemnoi obrobky metalevykh detalei [The method of three-dimensional processing of metal parts]. Ukrainian patent, no. 137568;
4. Zalyubovskiy, M., Panasyuk, I., & Malyshev V. (2019). Eksperymentalne vyznachennia enerhii neobkhdnoi dlia viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv [Experimental determination of the energy required to separate metal parts from foundries], Visnyk Kyiv National University of Technologies and Design – Bulletin of the KNUITD, 6, 9 – 17 [in Ukraine];
5. Burmistenkov, O. (2007). Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievi ta shkirhalantereyni promyslovosti: monohrafiia [Manufacture of cast details and articles of polymeric materials in the shoe and leather industry: monograph]. Khmelnytskyi [in Ukraine];
6. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, inventors

- Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. - Луганск: Ноулідж, 2011. – 59 с;
7. M. Marigo. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD / M. Marigo. - The University of Birmingham, UK., 2012;
8. C. Mayer-Laigle. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer / C. Mayer-Laigle, C. Gatumel, H. Berthiaux // Chemical Engineering Research and Design Volume 95, March 2015, Pages 248-261;
9. Патент №108645, МПК B01F 11/00, B24B 31/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201600830; заяв. 02.02.2016, опуб. 25.07.2016, бюл. № 14;
10. Патент №89571, МПК B01F 11/00. Машина для обробки деталей / Панасюк І.В., Залюбовський М.Г., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201313728; заяв. 26.11.2013, опуб. 25.04.2014, бюл. № 8;
11. Патент №108488, МПК B01F 11/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201511872; заяв. 01.12.2015, опуб. 25.07.2016, бюл. № 14;
12. Патент №127438, МПК B24B 31/00 (2018.01). Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201803397; заяв. 30.03.2018, опуб. 25.07.2018, бюл. № 14;
13. Патент №127611, МПК B24B 37/00 (2018.01), B24B 37/07 (2012.01). Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201802817; заяв. 20.03.2018, опуб. 10.08.2018, бюл. № 15;
14. Патент №132178, МПК B01F 11/00 (2018.01). Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В., заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – №u201809740; заяв. 01.10.2018, опуб. 11.02.2019, бюл. № 3;
15. Залюбовський М. Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія / М. Г. Залюбовський, І. В. Панасюк, В. В. Малишев – К.: Університет «Україна», 2018. – 228 с;
- (2017). Sposib volohoho shlifuvannia polimernykh detalei [The method of wet grinding of polymer parts]. Ukrainian patent, no. 113267;
7. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, inventors (2017). Sposib volohoho poliruvannia polimernykh detalei [The method of wet polishing of polymer parts]. Ukrainian patent, no. 113266;
8. Zalyubovskiy, M., Panasyuk, I., Smirnov Y., Klapsov, Y., & Malyshev, V. (2019). Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design, 2, Vol 132, 24-32. [in English];
9. Marigo, M. (2012). Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK, 316 [in English];
10. Mayer-Laigle C., Gatumel, C., & Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. Chemical Engineering Research and Design. [in English];
11. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 3, 260 – 264 [in English];
12. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). Vyznachennia zakonu zminy kutovoi shvydkosti veduchoho valu mashyny dlia obrobky detalei zi skladnym rukhom robochoi yemkosti [Determination of the law of change of angular velocity of the driving shaft of the machine for processing parts with complex movement of the working capacity], *Visnyk KNUVD – Bulletin of the KNUVD*, 5, 40-46 [in Ukraine];
11. Zalyubovskii, M., Panasyuk, V. (2020). On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 56, issue 1, 54 – 64 [in English];
14. M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, M. Cook, A. Ingram & E. H. Stitt. (2010) Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer Motion using Positron Emission Particle Tracking, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences. [in English];

16. Патент №105556, МПК B01F 11/00. Машина для обработки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201509212; заяв. 25.09.2015, опуб. 25.03.2016, бюл. № 6;
17. Патент №109083, МПК B01F 11/00, B24B 31/00. Машина для обработки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201601467; заяв. 18.02.2016, опуб. 10.08.2016, бюл. № 15;
18. Патент №126647, МПК B01F 11/00 (2018.01). Машина для обработки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – №u201801469; заяв. 15.02.2018, опуб. 25.06.2018, бюл. № 12;
19. Панасюк І.В. Визначення закону зміни кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей зі складним рухом робочої ємкості / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – №5. – С.40-46;
20. Igor Panasyuk. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / Igor Panasyuk, Mark Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №3. – P. 260-264
15. Artobolevskii, I. (1988). Teoriia mashin i mekhanizmov [Theory of machines and mechanisms]. Moscow [in Russian];
16. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, inventors (2019). Mashyna dlia obrobky detalei [Machine for processing parts]. Ukrainian patent, no. 133925.
17. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, inventors (2016). Mashyna dlia obrobky detalei [Machine for processing parts]. Ukrainian patent, no. 109083;
18. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, inventors (2018). Mashyna dlia obrobky detalei [Machine for processing parts]. Ukrainian patent, no. 126647;
19. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). Vyznachennia zakonu zminy kutovoi shvydkosti veduchoho valu mashyny dlia obrobky detalei zi skladnym rukhom robochoi yemkosti [Determination of the law of change of angular velocity of the driving shaft of the machine for processing parts with complex movement of the working capacity], Visnyk KNUVD – Bulletin of the KNUVD, 5, 40-46 [in Ukraine];
20. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. Metallurgical and Mining Industry, Vol. 3, 260 – 264 [in English]

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ДВУМЯ ЕМКОСТЯМИ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ СЛОЖНОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

ЗАЛЮБОВСКИЙ М.Г.¹, ПАНАСЮК И.В.², МАЛЫШЕВ В.В.¹

¹ Открытый международный университет развития человека «Украина»,

² Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследование основных кинематических параметров галтовочной машины с двумя подвижными емкостями, которые соединены между собой поступательной кинематической парой и выполняют сложное пространственное движение для возможности дальнейшего прогнозирования технологического результата на стадии проектирования такого оборудования и соответствующих технологических операций обработки деталей.

Методика. С применением системы автоматизированного проектирования SolidWorks-2016 Motion проведено 3D моделирование, с последующим выполнением кинематического анализа, машины для обработки деталей с двумя подвижными емкостями, которые соединены между собой поступательной кинематической парой и выполняют сложное пространственное движение. Суть кинематического анализа заключалась в определении линейных скоростей и ускорений точек, совпадающих с торцами рабочих емкостей машины.

Результаты. На основе 3D моделирования и кинематического анализа в системе автоматизированного проектирования SolidWorks-2016 Motion определены некоторые

кинematicкие параметры машины, в частности, в виде графических зависимостей получен закон изменения угловой скорости ведомого вала машины, исследовано изменение поступательной скорости и поступательного ускорения четырех точек, которые условно расположены в центре торцов каждой из рабочих емкостей.

Научная новизна. Установлена взаимосвязь между некоторыми кинematicкими параметрами (линейная скорость и линейное ускорение) разработанной конструкции машины с двумя подвижными емкостями, которые выполняют сложное пространственное движение.

Практическая значимость. Установлено, что кинematicкие параметры двух емкостей машины отличаются между собой, в результате чего, во время выполнения соответствующих технологических операций, интенсивность перемещения рабочего массива в двух емкостях будет отличаться между собой. Кроме того, торцы каждой из рабочих емкостей перемещаются практически с одинаковыми кинematicкими параметрами, что будет способствовать перемещению рабочего массива между противоположными торцами обеих емкостей во встречных направлениях с одинаковой интенсивностью. Полученные результаты дают возможность определить наиболее рациональное функциональное назначение исследуемой машины.

Ключевые слова: сложное пространственное движение, рабочая емкость, кинematicкие параметры, поступательное ускорение, поступательная скорость.

STUDY OF KINEMATIC PARAMETERS OF A MACHINE FOR PROCESSING PARTS WITH TWO CAPACITIES EXECUTING COMPLEX SPATIAL MOVEMENT

ZALYUBOVSKYI M.G.¹, PANASYUK I.V.², MALYSHEV V.V.¹

¹ Open University of Human Development «Ukraine»

² Kyiv National University of Technologies and Design

Goal. Investigation of the main kinematic parameters of a shredding machine with two moving tanks connected by a translational kinematic pair and performing complex spatial motion to be able to further predict the technological result at the design stage of such equipment and the corresponding technological operations of machining parts.

Method. Using the SolidWorks-2016 Motion computer-aided design system, 3D modeling was carried out, followed by kinematic analysis, of a machine for processing parts with two movable capacities, which are interconnected by a translational kinematic pair and perform complex spatial motion. The essence of kinematic analysis was to determine the linear velocities and accelerations of points that coincide with the ends of the working tanks of the machine.

Results. Based on 3D modeling and kinematic analysis in the SolidWorks-2016 Motion computer-aided design system, some kinematic parameters of the machine are determined, in particular, the law of the change in the angular velocity of the driven shaft of the machine is obtained in the form of graphical dependencies, the change in the translational speed and translational acceleration of four points, which are conventionally located in the center, is studied the ends of each of the working capacities.

Scientific novelty. The relationship between some kinematic parameters of the developed machine design with two moving capacities that perform complex spatial motion is established.

Practical importance. It was found that the kinematic parameters of the two tanks of the machine differ from each other, as a result of which, during the execution of the corresponding technological operations, the intensity of movement of the working array in the two capacities will differ from each other. In addition, the ends of each of the working capacities move with almost the same kinematic parameters, which will facilitate the movement of the working array between the opposite ends of both tanks in opposite directions with the same intensity. The results obtained make it possible to determine the most rational functional purpose of the machine under study.

Key words: complex spatial motion, working capacity, kinematic parameters, translational acceleration, translational speed.

УДК 681.5.03

ЗДОРЕНКО В.Г.¹, СЕБКО К.В.²

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОАНЕМОМЕТРА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ МИКРОХВИЛЬОВОЇ КАМЕРИ

Мета. Метою статті є дослідження раціонального режиму роботи термоанемометра за динамічними характеристиками та похибками вимірювань, під час реалізації процесу сушіння горіхової сировини в мікрохвильовій камері.

Методика. Використано методику дослідження інформативних параметрів теплового потоку, для визначення раціонального режиму роботи термоанемометра та скорочення часу теплової обробки горіхової сировини.

Результати. Надано теоретичне обґрунтування та алгоритм визначення динамічних характеристик термоанемометра при зовнішньому синусоїдальному впливі температури теплового потоку, наведено алгоритми визначення миттєвих значень прирощень температури чутливого елемента термоанемометра в процесі сушіння горіхової сировини.

Наукова новизна. Полягає у тому, що знайшли подальший розвиток теоретичні положення роботи термоанемометра у напрямку досліджень характеристик теплового перехідного процесу обробки горіхової сировини, все це надає змогу щодо визначення діапазонів зміння сигналів теплового пристрою, які відповідають межам зміння інформативних характеристик рухомого теплового потоку, надає змогу здійснювати вибір вимірювальної апаратури, встановити раціональні за похибками і чутливостями режими роботи термоанемометрів та автоматизованих пристроїв, які їх використовують.

Практична значимість. Запропоновані алгоритми визначення інформативних параметрів теплового потоку під час дослідження перехідного процесу передачі тепла від рухомого потоку повітря до чутливого елемента перетворювача, знайдені результати похибок вимірювань швидкості V рухомого теплового потоку надають змогу для розрахунків, конструювання та створення вимірювальних автоматизованих пристроїв, які використовують термоанемометри, у харчовій та переробній промисловості, приладобудуванні та хімічному машинобудуванні.

Ключові слова: горіхова сировина, мікрохвильова камера, динамічні характеристики, тепловий потік, інформативні параметри, швидкість потоку, температура чутливого елемента, стала часу, стаціонарне та нестаціонарне рішення, похибки непрямих вимірювань.

Вступ. Однією з основних проблем харчової промисловості України у сучасних ринкових умовах є збільшення обсягів виробництва з постійними вимогами підвищення якості продукції, що випускається. Вирішення цього завдання можливе як за рахунок вдосконалення та оптимізації існуючих технологічних процесів, так і за допомогою широкого впровадження нових методів виробництва та контролю харчової продукції. Стабільний розвиток харчової промисловості безпосередньо залежить від якості кінцевого продукту [1]. На теперішній час в таких галузях вітчизняної промисловості як харчова і переробна — широко застосовуються мікрохвильові технології [1-3]. При цьому, мікрохвильові технології охоплюють такі важливі промислові процеси як сушіння і пастеризація продовольчої сировини та харчових продуктів, теплову обробку продовольчої сировини та ін. Найважливішими для виготовлення кондитерських виробів є продукти рослинного походження, такі як арахіс, мигдаль, волоські горіхи, кеш'ю та інша горіхова сировина [1]. Основними способами обробки горіхової сировини є високотемпературна сушка (до 160 °C) та обсмажування. У зв'язку з ро-

зширенням асортименту кондитерських виробництв підвищуються вимоги до якості готової продукції, що нерозривно пов'язано з удосконаленням технології виробництва як безпосередньо кондитерських виробів, так і основних інгредієнтів, що входять до складу виробів. При цьому, операції сушіння і обсмажування дозволяють підвищити поживну цінність і скоротити втрати у продукті цінних поживних речовин і вітамінів в процесі обробки [1]. Слід визначити, що для підвищення якості теплової обробки горіхової сировини, важливе значення мають методи та засоби вимірювань швидкості потоку повітряного теплоносія та температури, тобто параметрів оптимізації робочих режимів мікрохвильової камери. У свою чергу, температура та швидкість теплового потоку пов'язані з теплопровідністю, температуропровідністю, діелектричною проникністю та іншими характеристиками сировини, що оброблюється [2, 3]. Слід визначити, що вказані характеристики державними службами віднесено до нормативних та базових показників технологічних процесів обробки харчової сировини. При цьому, технологічний процес сушіння горіхової сировини включає до себе операції пов'язані з вимірюванням та регулюванням двох основних параметрів – вологості та температури, ця задача вирішується за допомогою застосовування спеціальних вимірювальних пристроїв [2, 3]. Під час обробки експериментальних даних необхідно враховувати кількість енергії, яка може бути перетворена в залежності від матеріалу (який підлягає обробці) в теплову, тобто в корисний тепловий потік, який залежить від КПД камери та магнетрона [2-10]. Таким чином, дослідження ефективних методів вимірювання інформативних характеристик теплового потоку, а також визначення раціональних режимів роботи вимірювальних теплових пристроїв та скорочення часу теплової обробки горіхової сировини є важливою науково-практичною проблемою. Слід визначити, що підвищення продуктивності відповідного обладнання може бути досягнуто шляхом вдосконалення метрологічного забезпечення, а також за рахунок підвищення швидкості обробки харчової сировини та автоматизації процесу контролю показників нормативних документів, які встановлюються на конкретну продукцію.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження раціонального режиму роботи термоанемометра за динамічними характеристиками та похибками вимірювань, під час реалізації процесу сушіння горіхової сировини в мікрохвильовій камері.

Для досягнення мети, була зроблені наступна постановка конкретних завдань:

1. Надати теоретичне обґрунтування та алгоритм визначення динамічних характеристик термоанемометра при зовнішній синусоїдальній зміні температури теплового потоку.
2. Навести алгоритми визначення миттєвих значень прирощень температури Δt_n чутливого елемента (нитки термоанемометра), при синусоїдальному змінненні за часом прирощенні температури теплового потоку.
3. На основі загальної теорії похибок, визначити систематичні похибки непрямих вимірювань швидкості теплового потоку $\delta V/V$.

Результати дослідження. На (рис.1.), з урахуванням результатів робіт [2-11], наведено схему включення термоанемометра, яка включає до себе пристрій для лінеаризації характеристик теплового потоку. Змінний опір R_3 передбачено для регулювання струму I_1 . Для компенсації температурної похибки застосовують опір R_d . Зразкові апаратурні засоби, які складаються з двох опорів R_1 та R_2 , є необхідними для виконання умов рівноваги моста. В живильну діагональ моста вмикаємо компенсуючий пристрій R_k , який знаходиться в тих же температурних умовах, що і перетворювач R_n , але не обдувається тепловим потоком, при

цьому, компенсаційний перетворювач розташований в теплопровідній трубці з діаметром d . За допомогою вольтметра B , визначають падіння напруги на опорі R_k . Гальванометр Γ застосовують у якості нуль-індикатора, який передбачено для реєстрації рівноваги моста. Компенсуючий пристрій являє собою порцелянову трубку всередині якої знаходиться платиновий дріт [3]. Далі приймають умову, що температура теплового потоку $\Delta\theta_\theta$ змінюється за періодичним законом (синусоїдально за часом).

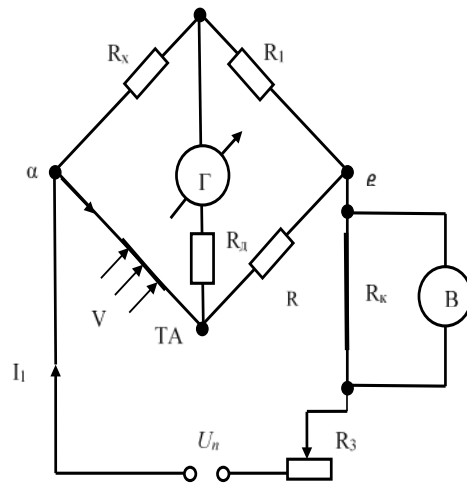


Рис.1. Схема включення термоанемометра для вимірювання швидкості V та температури t теплового потоку

В цьому випадку диференціальне рівняння для визначення температури чутливого елемента термоанемометра (нитки, яка знаходиться на шляху рухомого теплового потоку), має наступний вигляд:

$$\tau_n \Delta\theta_n' + \Delta\theta_n = \Delta\theta_{me} \sin(\omega_\theta t - \varphi_\theta) \quad (1)$$

де $\Delta\theta_{me}$ – амплітудне значення приросту температури теплового потоку; ω_θ – циклічна частота змінення температури $\Delta\theta_\theta$; φ_θ – фазовий кут зсуву, поміж припопненнями робочої температури магнетрону та температури теплового потоку $\Delta\theta_m$ і $\Delta\theta_\theta$.

Сталу часу τ_n , яку знаходять за формулою [2]:

$$\tau_n = \frac{m_n c_n}{G_{Tnn}} \quad (2)$$

де G_{Tnn} - теплова провідність матеріалу нитки; m_n – маса нитки; c_n - питома теплоємність матеріалу нитки.

Далі знаходимо розв'язок рівняння (1) у вигляді двох частин. Стаціонарна, загальна частина розв'язку $\Delta\theta_\theta^*$, має наступний вигляд:

$$\Delta\theta_\theta^* = \Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t} e^{-j\varphi_\theta} \quad (3)$$

Застосувавши символічний метод операцій з комплексними числами [12], запишемо диференціальне рівняння (1) у вигляді:

$$\tau_n \frac{d(\Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t})}{dt} + \Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t} = \Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t} e^{-j\varphi_\theta} \quad (4)$$

де $\Delta\theta_{m\epsilon}$ – амплітудне значення приросту температури чутливого елементу термоанометра.

Знайшовши похідну в (4), маємо:

$$j\omega_{\epsilon}\tau_n e^{j\omega_{\epsilon}t} \Delta\theta_{mn} + \Delta\theta_{mn} e^{-j\omega_{\epsilon}t} = \Delta\theta_{m\epsilon} e^{j\omega_{\epsilon}t} e^{-j\varphi_{\epsilon}} \quad (5)$$

Скоротивши в співвідношенні (5) обидві його частини на $e^{j\omega_{\epsilon}t}$, перепишемо (5) у вигляді:

$$j\omega_{\epsilon}\tau_n \Delta\theta_{mn} + \Delta\theta_{mn} = \Delta\theta_{m\epsilon} e^{-j\varphi_{\epsilon}} \quad (6)$$

Амплітудне значення приросту температури нитки на підставі (6), можна визначити зі співвідношення:

$$\Delta\theta_{mn} = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{1 + j\omega_{\epsilon}\tau_n} \quad (7)$$

Виходячи з формули (7), отримаємо модуль приросту $\Delta\theta_{mn}$:

$$|\Delta\theta_{mn}| = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{|1 + j\omega_{\epsilon}\tau_n|} = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{\sqrt{1 + \omega_{\epsilon}^2 \tau_n^2}} \quad (8)$$

Для визначення фазового кута зсуву φ_n , поміж прирощеннями температур $\Delta\theta_{\epsilon}$ і $\Delta\theta_n$, необхідно чисельник та знаменник (7) помножити на комплексно-спряжену величину $|1 - j\omega_{\epsilon}\tau_n|$, звідси:

$$\Delta\theta_{mn} = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{1 + \omega_{\epsilon}^2 \tau_n^2} (1 - j\omega_{\epsilon}\tau_n) \quad (9)$$

Далі фазовий кут зсуву φ_n визначають з виразу:

$$\varphi_n = \arctg(-\omega_{\epsilon}\tau_n). \quad (10)$$

де знак «-» характеризує відставання кута φ_n порівняно з кутом φ_{ϵ} .

З урахуванням (9) стаціонарний розв'язок диференціального рівняння (1), набуває вигляду:

$$\Delta\theta_n^* = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{\sqrt{1 + \omega_{\epsilon}^2 \tau_n^2}} \sin(\omega_{\epsilon}t - \varphi_{\epsilon} - \varphi_n). \quad (11)$$

Для знаходження частинного нестационарного рішення рівняння (1), запишемо вираз (1) у наступному вигляді:

$$\tau_n \Delta\theta_n' + \Delta\theta_n = \Delta\theta_{\epsilon}. \quad (12)$$

де знаком «штрих» позначено похідну $\Delta\theta_{\epsilon}$ за часом t .

При цьому повний розв'язок рівняння (11), запишемо у вигляді:

$$\Delta\theta_n = \Delta\theta^* + \Delta\theta^{**}. \quad (13)$$

де $\Delta\theta^*$ і $\Delta\theta^{**}$ - загальні (стаціонарні) та частинні (нестационарні) рішення рівняння (1). При цьому, частинні рішення рівняння (1), знаходять при умові дорівнювання нулю правої частини (1), тобто:

$$\tau_n \Delta\theta_n' + \Delta\theta_n = 0. \quad (14)$$

Далі необхідно скласти характеристичне рівняння, у такому випадку:

$$\tau_n K + 1 = 0, \quad (15)$$

при цьому:

$$\Delta \theta_n' = K. \quad (16)$$

Звідси випливає, що

$$K = -\frac{1}{\tau_n}. \quad (17)$$

Таким чином, частинне рішення запишемо у вигляді експоненти:

$$\Delta \theta_n^{**} = A e^{-\frac{t}{\tau_n}}. \quad (18)$$

З урахуванням (11) і (18), повне рішення рівняння (1), запишемо у вигляді:

$$\Delta \theta_n = \Delta \theta^* + \Delta \theta^{**} = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\omega_n t - \varphi_s - \varphi_n) + A e^{-t/\tau_n}. \quad (19)$$

Використовуючи початкові умови, які полягають у тому, що при $t = 0$ приріст температури чутливого елемента термоанемометра $\Delta \theta_n = 0$, одержимо на підставі (19) співвідношення для визначення узагальненого коефіцієнта C_1 , при цьому:

$$0 \approx \Delta \theta_n^* + \Delta \theta_n^{**} = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\varphi_s + \varphi_n) + C_1, \quad (20)$$

звідси:

$$C_1 = -\frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\varphi_s + \varphi_n). \quad (21)$$

Отже, з урахуванням (19)-(21), знайдемо вираз для миттєвих значень прирощення $\Delta \theta_n$ температури нитки термоанемометра при синусоїдальному змінненні за часом прирощення температури теплового потоку. У такому випадку маємо:

$$\Delta \theta_n = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin[\omega_n t - (\varphi_s + \varphi_n)] + \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\varphi_s + \varphi_n) e^{-t/\tau_n}, \quad (22)$$

або, спростивши (22):

$$\Delta \theta_n = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} [\sin[\omega_n t - (\varphi_s + \varphi_n)] + e^{-t/\tau_n} \sin(\varphi_s + \varphi_n)]. \quad (23)$$

Далі визначимо температуру, нитки термоанемометра у відповідності з загальним нестационарним рівнянням теплового балансу [3-12]. Нехтуючи складовими в рівнянні теплового балансу перетворювача: пов'язаними з: потоком потужності, що йде від тіла, (потік обумовлений переносом тепла через теплопровідність самого тіла), з потоком потужності, що віддається тілом (це потік, який пов'язано з теплопровідністю середовища навколо тіла), з потоком потужності що йде від тіла до середовища, який пов'язано з конвекцією середовища (що оточує тіло), з потоком потужності, що уноситься від тіла через випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль [3-12], маємо нестационарне рівняння для нитки, яку розташовано на шляху теплового потоку, у вигляді:

$$P_n \approx mc \frac{d\theta}{dt}, \quad (24)$$

де mc – потік потужності, який визначає теплоємність тіла; $d\theta/dt$ – похідна температури за часом.

Звідси визначимо температуру нитки:

$$\theta = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_n}{mc} dt, \quad (25)$$

де t_1 і t_2 - початковий і кінцевий час нагрівання нитки.

Вважаючи величини P_n , m і c постійними та незалежними від температури і часу, одержимо вираз:

$$\theta = \frac{P_n}{mc} (t_2 - t_1). \quad (26)$$

При цьому, температура θ лінійно залежить від часу t , отже задавшись часом нагрівання Δt , маємо:

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (27)$$

Далі прийнявши $t_1 \approx 0$, знайдемо за формулою (25) при відомих P_n , m і c температуру нитки термоанемометра. Оскільки нитка має невеликий діаметр d_n , в межах $0,2 \leq d_n \leq 1,2$ мм і електричний струм прогріває її за всією довжиною l_n , вона досить швидко нагрівається до температури θ , що визначається формулою (25). Тому при розрахунках величин температури θ , час Δt нагрівання нитки можна прийняти 0,5 - 1 с. Результати розрахунків сталих часу нитки термоанемометра τ_n та τ_{tn} рухомого теплового потоку, складають $\tau_n = 0,59$ с та $\tau_{tn} = 0,6$ с - відповідно, тобто чисельні значення сталих часу τ_n і τ_{tn} є практично сумірними.

Користуючись формулою для визначення похибок непрямих вимірювань, отримаємо вираз для розрахунку відносної систематичної похибки непрямого вимірювання швидкості теплового потоку V , який обдуває чутливий елемент термоанемометра. Формула для визначення похибок непрямих вимірювань, у загальному випадку, має наступний вигляд [3]:

$$\frac{\delta a}{a} = \frac{f^{x \cdot x}}{a} \cdot \frac{\delta x}{x} + \frac{f^{y \cdot y}}{a} \cdot \frac{\delta y}{y} + \frac{f^{z \cdot z}}{a} \cdot \frac{\delta z}{z} + \dots + \frac{f^{t \cdot t}}{a} \cdot \frac{\delta t}{t}. \quad (28)$$

Причому, функція a є функцією багатьох змінних $a = f(x, y, z, \dots, t)$, де $x, y, z, \dots, t$ аргументи функції a [3].

Для залежності швидкості V теплового потоку від значення падіння напруги U_k на компенсуючому пристрої, тобто $V = f(U_k)$, маємо:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\delta V}{\delta U_k} \cdot \frac{U_k}{V} \cdot \frac{\delta U_k}{U_k}, \quad (29)$$

або

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{1}{\frac{\delta U_k}{\delta V}} \cdot \frac{U_k}{V} \cdot \frac{\delta U_k}{U_k}. \quad (30)$$

де відношення $\delta V / \delta U_k$ є значенням чутливості термоанемометра $\frac{\delta V}{\delta U_k} = S_1$.

Оскільки залежність $U_k = f(V)$ є лінійною, то чутливість S_1 – постійна величина для всіх точок V .

Звідси:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{1}{S_1} \cdot \frac{U_k}{V} \cdot \frac{\delta U_k}{U_k}, \quad (31)$$

$$K = \frac{1}{S_1} \cdot \frac{U_k}{V}, \quad (32)$$

де K коефіцієнт впливу.

Далі знайдені чисельні значення систематичних похибок вимірювань при різних швидкостях повітряного потоку, складають відповідно:

$$\begin{aligned} V = 10 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,1}{10} \cdot 0,91 = 5,56\% \\ V = 15 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot 5 \cdot 0,83 = 3,69\% \\ V = 20 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,29}{20} \cdot 0,78 = 2,79\% \\ V = 25 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,39}{25} \cdot 0,72 = 2,22\% \\ V = 30 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,48}{30} \cdot 0,68 = 1,86\% \\ V = 35 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,57}{35} \cdot 0,64 = 1,59\% \\ V = 40 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,66}{40} \cdot 0,6 = 1,38\% \end{aligned}$$

Таким чином, зменшення похибки вимірювань швидкості V пояснюється тим, що зі зростанням V збільшується значення U_k . Слід визначити, що в формулі (31), значення напруги U_k – зростає значно повільніше, ніж в знаменнику швидкість V . Всі ці фактори знижують відносну систематичну похибку непрямого вимірювання швидкості теплового потоку, тобто $\delta V / V$. Будемо вважати, що зведена похибка вимірювання швидкості теплового потоку визначається кінцем шкали термоанемометра, тобто дорівнює: $V = 40$ м/с. Результати визначення залежності похибки $\delta V / V$ від швидкості V , наведено в табл. 1 та відображено на (рис.1).

Таблиця 1

Залежність похибки $\delta V / V$ від швидкості V

$V; \text{м/с}$	10	15	20	25	30	35	40
$\delta V / V; \%$	5,56	3,69	2,79	2,22	1,86	1,59	1,38

При цьому, за динамічними характеристиками та похибками вимірювань, найбільш раціональним є режим сталого опору нитки термоанемометра, тобто режим який відповідає умові:

$$I^2 c_2 = \xi(v_1) S (c_1 - \theta_{cp}), \quad (33)$$

де I – струм; ξ – коефіцієнт конвекції; S – площа поверхні нитки; θ – температура середовища, яке оточує нитку термоанемометра; c_1 та c_2 – сталі коефіцієнти за опором та температурою нитки термоанемометра:

$$\begin{cases} \Omega_{nv1} = \text{const} = c_2, \\ \theta_{nv1} = \text{const} = c_1 \end{cases}, \quad (34)$$

де Ω_{nv1} та $\Delta\theta_{nv1}$ – опір та температура нитки термоанемометра при прирощенні температури $\Delta\theta_1$.

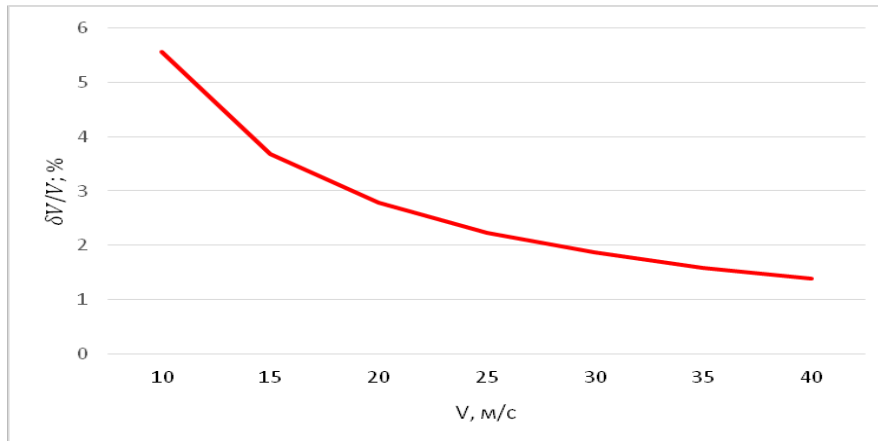


Рис. 1. Залежність похибки вимірювань $\delta V/V$ від швидкості теплового потоку, $\delta V/V = f(V)$

Таким чином, досліджено характеристики теплового перехідного процесу під час сушіння горіхової сировини в мікрохвильовий камері, визначено систематичні похибки вимірювань швидкості повітряного потоку в діапазоні від 10 до 40 м/с. Знайдені сталі часу термоанемометра τ_n та τ_{tn} рухомого теплового потоку.

Висновки. Таким чином, дану роботу присвячено дослідженню метода вимірювання інформативних характеристик теплового потоку, для визначення раціонального режиму роботи термоанемометра та скорочення часу теплової обробки горіхової сировини. При цьому, кількість тепла, яка передається чутливому елементу тепловим потоком, залежить від фізичних характеристик рухомого середовища, геометричних розмірів і орієнтування чутливого елемента – нитки термоанемометра, зі зростанням температури нитки - чутливість термоанемометра збільшується. В рамках дослідження сформульованої наукової і практичної проблеми, надано теоретичне обґрунтування та алгоритм визначення динамічних характеристик термоанемометра при зовнішній синусоїдальній зміні температури теплового потоку, наведено алгоритми визначення миттєвих значень прирощень температури чутливого елемента термоанемометра. Оскільки чисельні значення сталих часу τ_n і τ_{tn} є практично сумірними, виникає можливість контролю миттєвих значень температури теплового потоку.

Досліджено алгоритми визначення похибок вимірювання функції багатьох аргументів, яка пов'язує сигнали термоанемометра з характеристиками теплового потоку. На основі загальної теорії похибок непрямих вимірювань в досліджуваному діапазоні змінення швидкості V , визначено відносні систематичні похибки непрямих вимірювань швидкості теплового потоку $\delta V/V$. При цьому, за динамічними характеристиками та похибками вимірювань при обдуванні рухомим тепловим потоком горіхової сировини, найбільш раціональним є режим сталого опору нитки термоанемометра. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні керованих автоматизованих систем спільних вимірювань параметрів готової продукції при реалізації мікрохвильових технологій пов'язаних з тепловою обробкою харчової сировини.

Література

1. Пономарьов С.Х., Сирохман Н.М. Безпека харчових продуктів: навч. посібник. Київ. Лібро, 2006. 224 с.
2. Кудрін О.Б., Данько В.П. Дослідження параметрів повітряного середовища в об'ємі холодильних камер для збереження овочів. Сучасні проблеми холодної техніки та технології. Збірник тез доповідей XI Всеукраїнської науково-технічної конференції. Одеса: ОНАХТ, 2017. 243 с
3. Маєвський С.М., Серій К.М. Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В.Карпенка, 2011. 116 с.
4. Безвесильная Е. Н., Ильченко А. В., Ткачук А. Г. Разработка математической модели термоанемометрического расходомера для измерения расхода биологического топлива. Харків: Технологічний аудит та резерви виробництва, 2014. № 5/1(19). С.4-8.
5. Безвесільна О.М., Шавурський Ю.О. Експериментальні дослідження термоанемометричного витратоміру біопалива. Вісник Інженерної академії України, 2011. №1. С. 61-67.
6. Обух І. Я., Яцук Ю.В. Олеськів Т.М. Інваріантний до температури довкілля термоанемометр для побудови газових лічильників. Східно-Європейський журнал передових технологій. Харьков, 2009. С. 4-10.
7. Кузнецов Д.Н., Лебедев В.Н., Перебейнос В.В. Исследование импульсного термоанемометра с термопарой в качестве термочувствительного элемента. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2012. №23 (201). С. 170-176.
8. Фединець В.О., Кулик О.М. Дослідження умов теплообміну первинного перетворювача температури, суміщеного з трубою повного тиску в тепловому лічильнику. Львів: Науковий вісник НЛТУ України. Сер. Технологія та устаткування лісо-виробничого комплексу, 2014. С.1-7.
9. Fedynets V., Vasyukivskyi I., Yusyuk Y. Optimization of Gas Dynamical Subsystem of Transducers for Measurement of Gas Flow Temperature. Energy Eng. Control Syst., 2016, Vol. 2, pp. 43 – 48.
10. Фединець В.О. Особливості вимірювання температури газових потоків. Львів: Науковий вісник НЛТУ України. Сер. Механіка та машинобудування, 2013. Вип.23. С.148-152.
11. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Дослідження впливу температурного режиму потоку природного

References

1. Ponomarev S.H., Sirohman N.M. Food safety: textbook. manual. Kiev. Libro, 2006. 224 p.
2. Kudrin O.B. , Danko V.P. Investigation of air parameters in the volume of refrigeration chambers for vegetable storage. Modern problems of refrigeration equipment and technology. Collection of abstracts of the XI All-Ukrainian scientific and technical conference. Odessa: ONAHT, 2017. 243 p
3. Mayevsky S.M. , Gray K. M. Physical methods and means of control of environments, materials and products. Lviv: Physico-Mechanical Institute named after GV Karpenko, 2011. 116 p.
4. Bezvesilnaya E.N., Ilchenko A.V., Tkachuk A.G. Development of a mathematical model of a thermoanemometric flowmeter for measuring the consumption of biological fuel. Kharkiv: Technological audit and production reserves, 2014. № 5/1 (19). P.4-8.
5. Bezvesilna O.M., Shavursky Y.O. Experimental studies of thermo-nemometric biofuel flowmeter. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, 2011. №1. Pp. 61-67.
6. Obukh I. J., Jatsuk J.V. Oleskiv T.M. Invariant to ambient temperature thermoanemometer for construction of gas meters. Eastern European Journal of Advanced Technologies. Kharkov, 2009. P. 4-10.
7. Kuznetsov D.N., Lebedev V.N., Perebeinos V.V. Investigation of a pulsed thermoanemometer with a thermocouple as a thermosensitive element. Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Computer technology and automation. Donetsk: DonNTU, 2012. №23 (201). P. 170-176.
8. Fedinets V.O., Kulik O.M. Investigation of the heat exchange conditions of the primary temperature converter combined with the full pressure tube in the heat meter. Lviv: Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. Ser. Technology and equipment of the forest production complex, 2014. P.1-7.
9. Fedynets V., Vasyukivskyi I., Yusyuk Y. Optimization of Gas Dynamical Subsystem of Transducers for Measurement of Gas Flow Temperature. Energy Eng. Control Syst., 2016, Vol. 2, pp. 43 - 48.
10. Fedinets VO Features of measuring the temperature of gas flows. Lviv: Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. Ser. Mechanics and Mechanical Engineering, 2013. Issue 23. P.148-152.

газу на точність вимірювання його витрати методом змінного перепаду тиску. Львів: Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Сер. Автоматика, вимірювання та керування, 2007. № 574. С. 29-38.

12. Левченко Т.В. Загальна електротехніка з основами автоматики: навчальний посіб. Київ: Аграрна освіта, 2010. 358 с.

11. Matiko F.D., Fedoryshyn R.M. Investigation of the influence of the temperature regime of natural gas flow on the accuracy of measuring its flow by the method of variable pressure drop. Lviv: Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Ser. Automation, measurement and control, 2007. № 574. P. 29-38.

12. Levchenko T.V. General electrical engineering with the basics of automation: a textbook. Kyiv: Agrarian Education, 2010. 358 p.

ZDORENKO V.

alzd123@meta.ua

ORCID: 0000-0001-6508-4290

Kyiv National University of Technologies & Design

SEBKO K.

proff935@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8451-062X

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОАНЕМОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА МИКРОВОЛНОВОЙ КАМЕРЫ

ЗДОРЕНКО В.Г.¹, СЕБКО К.В.²

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Целью статьи является исследование рационального режима работы термоанемометра в соответствии с динамическими характеристиками и погрешностями измерений, при реализации процесса сушки орехового сырья в микроволновой камере.

Методика. Использована методика исследования информативных параметров теплового потока, для определения рационального режима работы термоанемометра и сокращения времени тепловой обработки орехового сырья.

Результаты. Приведено теоретическое обоснование и алгоритм определения динамических характеристик термоанемометра при внешнем синусоидальном воздействии температуры теплового потока, приведены алгоритмы определения мгновенных значений приращений температуры чувствительного элемента термоанемометра в процессе сушки орехового сырья.

Научная новизна. Заключается в том, что получили дальнейшее развитие теоретические положения работы термоанемометра в направлении исследований характеристик теплового переходного процесса обработки орехового сырья, все это дает возможность для определения диапазонов изменения сигналов теплового устройства, которые соответствуют диапазонам изменения информативных характеристик движущегося теплового потока, а также позволяет осуществлять выбор измерительной аппаратуры, установить рациональные в соответствии с погрешностями и чувствительностями режимы работы термоанемометров и автоматизированных устройств, которые их используют.

Практическое значение. Предложенные алгоритмы определения информативных параметров теплового потока при исследовании переходного процесса передачи тепла от движущегося потока воздуха к чувствительному элементу преобразователя, найденные результаты погрешностей измерений скорости V движущегося теплового потока, дают возможность для расчетов, конструирования и создания измерительных автоматизированных устройств, которые используют термоанемометры в пищевой и перерабатывающей промышленности, приборостроении и химическом машиностроении.

Ключевые слова: ореховое сырье, микроволновая камера, динамические характеристики, тепловой поток, информативные параметры, скорость потока, температура чувствительного элемента, постоянная времени, стационарное и нестационарное решение, погрешности косвенных измерений.

THE RESEARCH OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE THERMO ANEMOMETER BASED ON THE MEASUREMENT CONTROL OF THE HEAT FLOW OF THE MICROWAVE CAMERA

ZDORENKO V.G.¹, SEBKO K.V.²

¹Kiev National University of Technology and Design

²National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Purpose. The purpose of the article is to study the rational operation of the hot-wire anemometer in accordance with the dynamic characteristics and measurement errors, when implementing the process of drying raw nuts in an industrial microwave chamber.

Methodology. The technique of studying the informative parameters of the heat flow was used to determine the rational mode of operation of the hot-wire anemometer and to reduce the time of heat treatment of nut raw materials.

Results. The characteristics of the thermal transient process of drying raw nut materials in a microwave chamber are investigated. Theoretical substantiation and an algorithm for determining the dynamic characteristics of the hot-wire anemometer under the external sinusoidal effect of the heat flow temperature are given, algorithms for determining the instantaneous values of the temperature increments of the hot-wire anemometer sensitive element in the process of drying nut raw materials are given. On the basis of the general theory of errors of indirect measurements in the investigated range of variation of the rate V of the heat flow, the values of the relative systematic errors of indirect measurements of the rate of heat flow in the range from 10 to 40 m / s were determined. It was found that in accordance with the dynamic characteristics and measurement errors when blowing a moving heat flow of nut raw materials, the most rational is the mode of constant resistance of the hot-wire anemometer. Solutions of the differential equation describing the dynamic heat process when the temperature of the moving heat flow changes according to the periodic law, i.e. stationary, non-stationary and complete. The results of calculating the constant times of the hot-wire anemometer thread τ_n and τ_{mn} of the moving heat flow, respectively, were $\tau_n = 0.59$ s and $\tau_{mn} = 0.6$ s, the time constant of the hot-wire anemometer is practically commensurate with the thermal time constant of the moving stream blowing over the nut raw material.

Scientific novelty. It consists in the fact that the theoretical position of the hot-wire anemometer has been further developed in the direction of researching the characteristics of the thermal transient process of processing nut raw materials, all this makes it possible to determine the ranges of changes in the signals of the thermal device, which correspond to the ranges of change in the informative characteristics of the moving heat flow, and also allows the selection measuring equipment, establish rational operating modes of hot-wire anemometers and automated devices that use them in accordance with errors and sensitivities.

Practical value. The proposed algorithms for determining the informative parameters of the heat flow in the study of the transient process of heat transfer from the moving air flow to the sensitive element of the transducer, the results of the errors in measuring the velocity V of the moving heat flow, make it possible to calculate, design and create measuring automated devices that use hot-wire anemometers in food and processing industry, instrument making and chemical engineering.

Key words: raw nuts, microwave chamber, dynamic characteristics, heat flow, informative parameters, flow rate, temperature of the sensitive element, time constant, stationary and non-stationary solution, indirect measurement errors.

УДК 677.055.621

БЕРЕЗІН Л. М.

Київський національний університет технологій та дизайну

ЕКСПРЕС-АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ МЕХАНІЗМІВ НА НАДІЙНІСТЬ ШКАРПЕТКОВИХ АВТОМАТІВ

Мета. Розробка методології оперативної оцінки впливу інноваційних рішень стосовно техніко-експлуатаційних характеристик окремих механізмів та систем на надійність шкарпеткового автомату за апостеріорною інформацією про відмови на виробництві.

Методика. Використовується метод пошуку, опису, аналогій та аналізу інформації для аудиту множини можливих рішень стосовно предмету досліджень, основи теорії надійності, методи оцінки показників надійності за експериментальними даними, теорія матриць, елементи числових методів та методологія апостеріорного аналізу надійності структурно-складних технічних систем.

Результати. Представлено алгоритм розрахунку та математичне забезпечення для оперативної оцінки впливу техніко-експлуатаційних змін одного з механізмів на надійність шкарпеткового автомата в цілому в умовах невизначеності інформації про відмови та джерел її надходження. Отримано числову оцінку ступеня впливу на надійність автомату змін в конструкції в'язального механізму. Показано переваги запропонованого підходу в порівнянні з традиційним, що дозволяє зменшити тривалість проектування при забезпеченні необхідної якості та мінімізації витрат за рахунок обмеження випробувань та обчислень.

Наукова новизна. Полягає в подальшому розвитку теорії і методології аналізу надійності шкарпеткових автоматів на етапах проектування або модернізації надійності шкарпеткових автоматів у випадках керованої різноманітності конструктивних варіантів інноваційних механізмів при обмеженості інформації про відмови та за умови збереження функціонально-структурних зв'язків.

Практична значимість. Запропонована методика моделювання надійності шкарпеткового автомату за інноваційними рішеннями його механізмів, що мінімізує витрати на додаткові випробування та обчислення. Результати викладеної концепції експрес - аналізу надійності автомату підтвердили достатню точність обчислень на етапі перед проектної підготовки, що дозволяє використовувати її для інших в'язальних машин.

Ключові слова: шкарпетковий автомат, інновації, надійність, проектування, розрахунок.

Вступ. Сучасне проектування технологічного обладнання характеризується швидкою адаптацією до постійних інновацій, керованою зміною техніко-технологічних вимог і конструктивних варіантів, подовженням життєвого циклу. Незважаючи на перехід до конструкцій з новітніми рішеннями, важливою вимогою проектування машин залишається мінімізація його тривалості та витрат при забезпеченні необхідної якості. Надійність як характеристика якості має важливе значення при створенні трикотажного обладнання, оскільки в перспективі процес в'язання представляється неперервним і наближено без залучення обслуговуючого персоналу.

Враховуючи, що аналітичні дослідження надійності потребують подальшої експериментальної перевірки, перевагу віддають передусім випробування, які поділяють на три групи:

- стендові випробування натурних дослідних або серійних зразків в заводських умовах, які максимально наближені до експлуатаційних у відповідності до зазначених в нормативно-технічній документації [1];

- комп'ютерне статистичне моделювання процесів експлуатації, переважно методом Монте-Карло, що описують процес зміни технічного стану об'єкту [2,3];

- за результатами обробки статистичних даних про відмови в умовах експлуатаційних [4, 5].

Оскільки накопичення достатніх об'ємів інформації про відмови в умовах підконтрольної експлуатації машин характеризується більш короткими термінами, незначними витратами, достовірністю реальних режимів навантаження, переважно використовують дослідження третьої групи. Система збору та обробки інформації про експлуатаційну надійність достатньо регламентована у відповідності до стандартів [5]), але наведені рекомендації мають замкнутість розрахунків на об'єкт в цілому, а методичний підхід до оперативної оцінки впливу на його надійність інноваційних рішень стосовно окремих механізмів відсутній.

Постановка завдання. Об'єктом досліджень вибрано базові одноциліндрові шкарпеткові автомати серій ОЗДС, які належать до найбільш структурно-складних машин в трикотажній галузі та представляють множину послідовно з'єднаних механізмів, коли відмова будь-якого з них призводить до відмови шкарпеткового автомата в цілому. При обмеженні термінів та бюджету на проектування концепція спрощеного експрес-аналізу впливу на надійність шкарпеткових автоматів кардинальних змін його механізмів представляється актуальною.

Метою статті є розробка методології оперативної оцінки впливу інноваційних рішень стосовно техніко-експлуатаційних характеристик окремих механізмів на надійність шкарпеткового автомата за апостеріорною інформацією про відмови.

Результати дослідження. За результатами експлуатаційних спостережень шкарпеткових автоматів встановлено [6], що розподіл наробіток на відмову узгоджується з експоненціальним законом, а його середнє значення становить $T_{cp} = 1,11$ год. Пропонується методологія визначення T_{cp} шкарпеткових автоматів за додатковими даними про надійність його видозмінених складових механізмів, що забезпечить скорочення термінів проектування.

Структура шкарпеткових автоматів обумовлена технологією в'язання виробів: кожна операція виконується набором певних механізмів циклічної дії. Виділимо основні механізми та системи:

- механізм в'язання (стерженьові та платині вироби: в'язальні голки, рисунчасті селектори, штовхачі та платини; рухомі та нерухомі клини замкових систем циліндру та платиною коронки; пружні елементи клинів та фіксації робочих органів в циліндрі; відкривачі клапанів голок тощо);

- система подачі латексної та основних ниток (як для пасивної системи – шпулярнику, спрямовуючі вічки, пристрої для контролю та стабілізації натягу ниток, нитководії, вертикальні ножі та защемлювачі, компенсатор додаткових ниток для підсилення п'ятки або миска виробу при реверсивному русі циліндру тощо);

- механізм управління (розподільний барабан з жорсткими багатоланковими передачами та тросовими тягами, лічильний ланцюг, пристрої для зміни нитководіїв і швидкісних режимів та інше);

- механізм рисунку (механізм селекторно-групового відбору петле твірних органів як для механічної системи відбору голок - рисунчасті барабани та система керування їх переміщенням, штовхачі відбору тощо; механізм селекторного індивідуального відбору з збавником та додавачем голок);

- електродвигун, привод головного валу з механічними передачами для інших механізмів, які технологічні траєкторії робочих органів при виконанні операцій технологічного циклу;

- кулісний механізм для забезпечення реверсивного руху циліндру,

- механізм пневматичної відтяжки та прийому виробу,

- механізм регулювання щільності в'язання виробу.

За даними експлуатаційних спостережень системи подачі ниток відомо [7], що середній наробіток складає 1,32 год., з [4] та [8] відповідно маємо для в'язального механізму - 11,18 год. та механізму рисунку - 364 год. При відсутності інформації про надійність механізмів використовували облікові формуляри витрат запасних частин за відмовами в міжремонтний період шкарпеткових автоматів з перерахунком на 2-змінний режим роботи, наприклад для механізмів рисунку та реверсивного руху циліндру. Приймаємо наступні позначення та величини середніх наробітків наявних механізмів та систем шкарпеткового автомату:

$T_1 = 1,32$ год. – для системи подачі ниток;

$T_2 = 11,18$ год. – в'язального механізму;

$T_3 = 23,82$ год. – інших механізмів;

$T_4 = 322$ год. – механізму управління;

$T_5 = 364$ год. – механізму рисунку;

$T_6 = 774$ год. – приводу;

$T_7 = 961$ год. – механізму реверсивного руху циліндру.

Складаємо варіаційний ряд із середніх наробітків механізмів та систем шкарпеткового автомату за умовою їх зростання виду $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5 < T_6 < T_7$, а саме:

$$T = (1,32; 11,18; 23,82; 322; 364; 774; 961). \quad (1)$$

Обчислюємо кількість відмов для кожного механізму $[k_i]$ за фіксований час T_{max} як найбільше ціле від наближеного значення:

$$k_i = \frac{T_{max}}{T_i}, \quad (2)$$

де T_{max} - максимальне значення із ряду середніх наробітків механізмів T_i (очевидно, що $T_{max} = T_7 = 961$ год.).

У відповідності до (2) та при відповідному округленні отримаємо ряд натуральних чисел як кількість відмов механізмів та систем шкарпеткового автомату виду $[k_1] = 728$; $[k_2] = 86$; $[k_3] = 41$; $[k_4] = 3$; $[k_5] = 3$; $[k_6] = 1$; $[k_7] = 1$.

Тоді загальна кількість відмов шкарпеткового автомату за час T_{max} , яка визначається відмовами його механізмів та систем, становить:

$$\nu = \sum_{i=1}^7 [k_i] = 728 + 86 + 41 + 3 + 3 + 1 + 1 = 863 \text{ відмови.} \quad (3)$$

Для обчислення середнього наробітку до відмови T_{cp} шкарпеткового автомату як сукупності систем, необхідна інформація про поточний час відмов. Для цього використовуємо суміщення даних про надійність складових механізмів і систем шкарпеткового автомату та складаємо узагальнюючу матрицю моментів відмов виду $(n \times [k_1])$ [3], а саме $T = [T_{ij}]_{n \times [k_1]}$:

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & \dots & T_{1[k_1]} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & \dots & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ T_{n1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $T_{1[k_1]}$ - момент часу $[k_1]$ - ої відмови механізму 1 (подачі ниток); T_{n1} - момент часу першої відмови n -ого механізму, тобто в позначенні T_{ij} маємо: i та j - номери механізму або системи та їх відмови відповідно.

Тоді стосовно шкарпеткового автомату маємо:

$$T = \begin{bmatrix} 1,32 & 2 \times 1,32 & 3 \times 1,32 & 4 \times 1,32 & \dots & 86 \times 1,32 & \dots & 728 \times 1,32 \\ 11,18 & 2 \times 11,18 & 3 \times 11,18 & 4 \times 11,18 & \dots & 86 \times 11,18 & \dots & 0 \\ 23,82 & 2 \times 23,82 & 3 \times 23,82 & 4 \times 23,82 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 322 & 2 \times 322 & 3 \times 322 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 364 & 2 \times 364 & 3 \times 364 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 774 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 961 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Оскільки середній наробіток кожного із механізмів або систем визначається відповідним рядком матриці (5) часу відмов як:

$$\begin{aligned} T_1 &= [T_{11} \ T_{12} \ T_{13} \ \dots \ T_{1[k_1]}], \\ T_2 &= [T_{21} \ T_{22} \ T_{23} \ \dots \ T_{2[k_2]}], \\ &\vdots \\ T_n &= [T_{n1}], \end{aligned} \quad (6)$$

то виконуємо перехід до рядка поточного часу відмов всього шкарпеткового автомату виду $T = [T_\gamma]$ [10]:

$$T = [T_{11} \ T_{12} \ \dots \ T_{1[k_1]} \ T_{21} \ T_{22} \ \dots \ T_{2[k_2]} \ \dots \ T_{n1}], \quad (7)$$

де γ - порядковий номер часу відмови шкарпеткового автомату в цілому (звичайно маємо, що $\gamma \leq \nu$).

Виконуємо упорядкування рядку (7) за принципом варіаційного ряду за умовою збільшення, тобто:

$$\begin{cases} t_o = 0 \\ t_1 = T_{11} \\ \dots \\ t_\theta = T_{n1} \end{cases},$$

де очевидно, що $0 \leq \theta \leq \nu$.

Тоді середній наробіток на відмову шкарпеткових автоматів визначається за формулою [1]:

$$T_{cp}' = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} (t_{i+1} - t_i)}{\nu} \quad (8)$$

Після обчислення даних матриці (5) за умовою (7) та формулою (8) отримуємо $T_{cp}' = 1,13$ год., що не перевищує розбіжність в 2% в порівнянні з результатом традиційної обробки даних експлуатаційних спостережень всього шкарпеткового автомату [6] і підтверджує принципову можливість використання запропонованого аналізу надійності.

Перевага даного підходу обрахунку надійності шкарпеткових автоматів, як будь-якої технічної системи, полягає в тому, що достатньо вносити зміни до інформації щодо надійності запропонованого механізму, а не виконувати повторні експлуатаційні спостереження або інші випробування, що значно впливає на кошторис та тривалість дослідження та обробки значного масиву даних.

Розглянемо застосування представлених положень при аналізі надійності шкарпеткових автоматів при інноваційній зміні одного з його механізмів при спадковості конструкцій інших. При невизначеності закону розподілу наробітків на відмову нового механізму рекомендовано використовувати ряд особливостей виходячи із наступних передумов [11]:

- раптові відмови періоду нормальної роботи підлягають опису експоненціальним законом розподілу;
- поступові відмови – нормальним;
- зносні відмови кінця періоду нормальної роботи – логарифмічно-нормальним,
- втомленісні відмови – розподілом Вейбула.
- відмови періоду приробітку – розподілом Релея.

Оскільки відмови періоду приробітку технічних систем не відносять до відмов їх нормальної експлуатації, то розподіл Релея не розглядаємо.

Орієнтовні графіки цих розподілів представлено на рисунку, а формули для обчислення середніх наробіток – в таблиці.

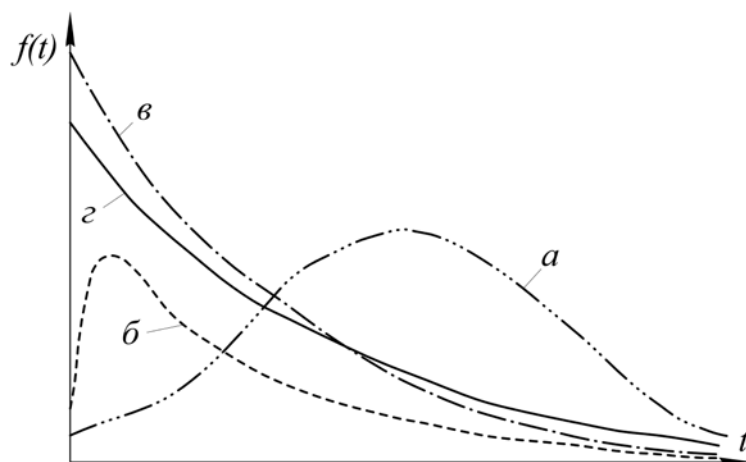


Рис. Орієнтовні графіки зміни найбільш поширених законів розподілу випадкових значень показників надійності технічних систем: $f(t)$ - закон розподілу; t - час; a - нормальний розподіл; $б$ - логарифмічно-нормальний розподіл; $в$ - експоненціальний розподіл; $г$ - розподіл Вейбула

Першочергово доцільно використовувати двох параметричний закон Вейбула, враховуючи його універсальність [11,12]:

- при $m < 1$ інтенсивність відмов $\lambda(t)$ та щільність розподілу $f(t)$ наробітків зменшуються;
- при $m = 1$ розподіл має $\lambda(t) = \text{const}$ та спадаючу функцію $f(t)$, що характерно для експоненціального закону;
- при $m > 1$ функція $f(t)$ має одну вершину, а $\lambda(t)$ - неперервне зростання: при $1 < m < 2$ з випуклістю вгору, а при $m > 2$ - вниз;
- при $m = 3,3$ розподіл Вейбула близький до нормального, який переважно використовують при поступових відмовах, які характерні для зносу деталей.

Таблиця

Формули для визначення законів розподілу та середнього наробітку T_{cp} між відмовами

Назва та графічне зображення розподілу	Закон розподілу $f(t)$ -	Середній наробіток на відмову T_{cp}
Нормальний	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ
Логарифмічно-нормальний	$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\exp(\mu + 0,5\sigma^2)$
Експоненціальний	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$1/\lambda$
Вейбула (при $m=1$)	$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right]$	$\eta \Gamma(1+m^{-1})$

Примітка. Використано наступні позначення: μ - середнє арифметичне; σ - середньо квадратичне відхилення; λ - інтенсивність відмов; η , m - параметри розподілу; $\Gamma(\cdot)$ - гамма-функція.

Оцінку параметрів розподілу Вейбула переважно виконують методом найменших квадратів для лінійної системи з однією незалежною за часом. Якщо данні вибірки відповідають закону Вейбула та справедливе лінійне рівняння виду:

$$y = mx - m \ln \eta, \quad (9)$$

де $y = \ln(-\ln(1-F(t)))$ та $x = \ln t$ при $F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right]$,

то значення параметрів розподілу Вейбула визначаються за формулами [11]:

$$m = b; \quad \eta = \exp\left(-\frac{a}{b}\right), \quad (10)$$

де a та b - коефіцієнти з [13,14]:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Надалі виконується перевірка на узгодженість значень теоретичного y_i та емпіричного $\hat{y}$ розподілів:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2}, \quad (11)$$

де $\bar{y}$ - середнє значення y .

Параметри математичної моделі відмов Вейбула також можна оцінювати методом максимальної правдоподібності при використанні способу послідовних наближень за формулами в [15]:

$$m = m_0 + \frac{m_0 \sum t^{m_0} (M \sum t^{m_0} + m_0 \sum \ln t \sum t^{m_0} - M m_0 \sum t^{m_0} \ln t)}{M ((\sum t^{m_0})^2 + m_0^2 \sum t^{m_0} (\ln t)^2 - m_0^2 \sum t^{m_0} \ln t)}, \quad (12)$$

$$\eta = \left(\frac{\sum t^{m_0}}{M} \right)^{1/m_0}, \quad (13)$$

де m_0 та m - початкове та кінцеве наближення параметру форми до кореню рівняння максимізації функції правдоподібності;

M - кількість відмов в вибірці.

До важливої практичної особливості розподілу Вейбула також можна віднести те, що надійність системи з послідовно з'єднаних однакових елементів, які підпорядковуються розподілу Вейбула, також підпадає під цей розподіл, що значно спрощує подальші розрахунки.

Враховуючи інноваційні рішення щодо зменшення інтенсивності відмов в'язальних голок за умовою міцності в в'язальному механізмі (кліни з криволінійною робочою гранню та зміна рівня відбійної площини), встановлено, що їх довговічність збільшуються в 2,4 рази, а середній наробіток на відмову механізму зміниться до $T_2' = 24,82$ год. Тоді рядок T_{2j}

матриці (4) включає $[k_2]' = 39$ відмов за час $T_{max} = 961$ год. при $k_2' = \frac{T_{max}}{T_2'} \frac{961}{24,82} = 38,71$ та приймає

наступний вид: $T_2' = [24,82 \quad 2 \times 24,82 \quad 3 \times 24,82 \quad \dots \quad 39 \times 24,82]$.

Після перетворень та обчислень за формулами (4)...(6) середній наробіток шкарпеткового автомату з інноваційним в'язальним механізмом зросте до 1,24 год.

Висновки. Запропоновано методологію та математичне забезпечення експрес-аналізу впливу змін окремих механізмів на надійність шкарпеткового автомату за апостеріорною інформацією про відмови. Очевидно, що інноваційні рішення передусім стосуються механізмів з високою інтенсивністю відмов, для яких тривалість збору інформації про відмови достатнього об'єму є незначною.

Слід зазначити, що отриманий інструментарій можна використовувати для оцінки інноваційних технічних рішень механізмів за критерієм надійності шкарпеткових автоматів, для кількісного порівняльного аналізу надійності та технічного рівня запропонованих на

вибір механізмів різних конструкцій, для моніторингу та обґрунтування напрямків щодо перспектив розвитку обладнання за надійністю.

В подальшій роботі за даною темою планується охопити питання дослідження надійності шкарпеткових автоматів за комплексним коефіцієнтом готовності, в якому разом з наробітками на відмову механізмів також враховуються терміни по відновленню їх працездатності.

Література

1. Хазов Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. - М.: Машиностроение, 1985. - 224с.
2. Якубович А.Н. Оценка надежности автотранспортных систем методами статистического моделирования (аналитический обзор) / А.Н. Якубович, И.А. Якубович, В.И. Россоха // Интеллект, инновации, инвестиции. – 2016. - №1. - С.89-94.
3. Задорожный В. Н. Имитационное и статистическое моделирование : учеб. пособие. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – 136 с.
4. Березін Л.М. Оцінка довговічності та надійності в'язальних механізмів панчішно-шкарпеткових автоматів: монографія / Л.М. Березін. – К.: КНУТД, 2013. – 191 с.
5. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. 1996-01-01.
6. Амро М.А. Исследование эксплуатационной надежности чулочных автоматов / М.А. Амро, В.П. Волощенко // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 1980. - №1. - С.120-122.
7. Новак С.Н. Повышение надежности системы нитеподачи одноцилиндровых чулочно-носочных автоматов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Новак. - К.: КТИЛП, 1991. - 21с.
8. Баранов А.А. Исследование и разработка механизма отбора одноцилиндровых рисунчатых чулочно-носочных автоматов с целью повышения их производительности: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: /А.А.Баранов. - Москва, МТИ, 1991. -

References

1. Khazov, B.F., Didusev, B.A. (1985). Spravochnik po raschetu nadezhnosti mashin na stadii proyektirovaniya [Handbook for calculating the reliability of machines at the design stage] Moscow: Mechanical Engineering [in Russian].
2. Yakubovich, A.N., Rossokha, V.I. (2016). Otsenka nadezhnosti avtotransportnykh sistem metodami statisticheskogo modelirovaniya (analiticheskiy obzor) [Assessment of the reliability of motor transport systems by methods of statistical modeling (analytical review)] Intellect, innovatsii, investitsii - Intellect, innovations, investments, Vol. 1, 89-94 [in Russian].
3. Zadorozhny, V. N. (2013). Imitatsionnoye i statisticheskoye modelirovaniye : ucheb. posobiye [Imitation and statistical modeling: textbook. allowance]. Omsk: Publishing house of OmSTU [in Russian].
4. Berezin, L. M. (2013). Otsinka dovhovichnosti ta nadiynosti v'iazalnykh mekhanizmiv panchishno-shkarpetkovykh avtomativ: monohrafiia [Estimation of the longevity and reliability of knitting mechanisms of hosiery machines: monograph]. Kyiv: National university of technologies & design [in Ukrainian].
5. DSTU 3004-95. Nadiynist tekhniky. Metody otsinky pokaznykiv nadiynosti za eksperymentalnymy danymy [State Standart 3004-95. Dependability of technics. Methods of estimation dependability by operating data]. Kyiv, Standartinform Publ., 1995. 129 p.
6. Amro, M.A., Voloschenko, V.P. (1980). Issledovaniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti chulochnykh avtomatov [Research of operational reliability of stocking machines] Izvestiya vuzov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti - Bulletin of Higher Education Institution. Technology of light industry, Vol. 1, 120-122 [in Ukrainian].
7. Novak, S.N. (1991). Povysheniye nadezhnosti sistemy nitepodachi odnotsilindrovyykh chulochno-nosochnykh avtomatov [Improving the reliability of the single-cylinder automatic hosiery thread feeding system]. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design [in Ukrainian].
8. Baranov, A. A. (1991). Issledovaniye i razrabotka mekhanizma otbora odnotsilindrovyykh risunchatykh chulochno-nosochnykh avtomatov s tsel'yu povysheniya ikh proizvoditel'nosti [Research and development of a mechanism for selecting single-cylinder patterned hosiery machines in

27с.

9. Liu Y., Fan J., Li Y. One system reliability assessment method for cnc grinder // Eksploatacja i Niezawodnosc na polskiej – Maintenance and Reliability. – 2014. – 16(1). – p. 97-104.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
11. Решетов Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высш. шк., 1988. – 238с.
12. Khalili A. Statistical properties of Weibull estimators / A. Khalili, K. Kromp // Journal of Materials Science, 1991. Vol. 26. – P. 6741-6752.
13. Канарчук В.С. Надійність машин / В.С. Канарчук, С.К. Полянський, М.М. Дмитрієв. – К.: Либідь, 2003. – 424 с.
14. Giordano A.A. Least square estimation with application to digital signal processing / A.A. Giordano, F.M. Hsu. – NY: Wiley digital archives, 1985. – 438 p.
15. Седуш В.Я. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин. – К.: Вища школа, 1981. – 264с.

order to increase their productivity]. Extended abstract of candidate's thesis. Moscow: Moscow Textile Institute [in Russian].

9. Liu, Y., Fan, J., Li Y. (2014). Odin metod otsenki nadezhnosti sistemy dlya shlifoval'nogo stanka s chpu [One system reliability assessment method for cnc grinder] Eksploatatsiya i nadezhnost' - Eksploatacja i Niezawodnosc, Vol.16(1), 97-104 [in English].
10. Korn, H., & Korn, T. (1974). Spravochnyk po matematyke (dlia nauchnykh rabotnykov y ynzhenyrov) [A handbook on mathematics (for scientists and engineers)]. Moscow: Nauka. [in Russian].
11. Reshetov, D.N., Yvanov, A.S. & Fadeev (1988). Nadezhnost mashyn [Reliability of machines]. Moscow: Visshaya shkola [in Russian].
12. Khalili, A., Kromp, K. (1991). Statisticheskiye svoystva otsenok Veybulla [Statistical properties of Weibull estimators] Journal of Materials Science, Vol. 26, 6741-6752 [in English].
13. Kanarchuk, V.E., Polyanskiy, S.K., Dmitriev, M.M. (2003) Nadezhnost mashyn [Reliability of machines]. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
14. Giordano, A.A., Hsu, F.M. (1985). Otsenka metodom naimen'shikh kvadratov s primeneniym k tsifrovoy obrabotke signalov [Least square estimation with application to digital signal processing]. NY: Wiley digital archives [in English].
15. Sedush, V.Ya. (1981) Nadezhnost', remont i montazh metallurgicheskikh mashin [Reliability, repair and installation of metallurgical machines] Kyiv: High school [in Ukrainian].

BEREZIN LEONID

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2672-6323>

ResearcherID: H-6012-2020

Docent of the Department of Applied Mechanics and Machines,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Docent, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.)

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ НА НАДЕЖНОСТЬ НОСОЧНЫХ АВТОМАТОВ

БЕРЕЗИН Л. Н.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработка методологии оперативной оценки влияния инновационных решений касательно технико-эксплуатационных характеристик отдельных механизмов и систем на надежность носочного автомата по апостериорной информации об отказах на производстве.

Методика. Используется метод поиска, описания, аналогий и анализа информации для аудита множества возможных решений по предмету исследований, основы теории надежности, методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным, теория матриц, элементы численных методов и методология апостериорного анализа надежности структурно-сложных технических систем.

Результаты. Представлен алгоритм расчета и математическое обеспечение для оперативной оценки влияния технико-эксплуатационных изменений одного из механизмов на надежность носочного автомата в условиях неопределенности информации об отказах и

источниках ее поступления. Получена числовая оценка степени влияния на надежность автомата изменений в конструкции вязального механизма. Показаны преимущества предложенного подхода в сравнении с традиционными решениями, что позволяет уменьшить длительность проектирования при обеспечении необходимого качества и минимизации затрат за счет ограничения испытаний и вычислений.

Научная новизна. Заключается в дальнейшем развитии теории и методологии анализа надежности носочных автоматов на этапе проектирования или модернизации в случаях управляемого разнообразия конструктивных вариантов инновационных механизмов при ограничении информации об отказах и при условии сохранения функционально-структурных связей.

Практическая значимость. Предложена методика моделирования надежности носочного автомата по инновационным решениям его механизмов, что минимизирует затраты на дополнительные испытания и вычисления. Результаты предложенной концепции экспресс - анализа надежности автомата подтвердили достаточную точность результатов вычислений на этапе проектирования, что позволяет использовать ее для других вязальных машин.

Ключевые слова: носочный автомат, инновации, надежность, проектирование, расчет.

EXPRESS ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INNOVATIVE SOLUTIONS FOR MECHANISMS ON THE RELIABILITY OF SOCK AUTOMATIC MACHINES

BEREZIN L. N.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose: development of a methodology for operational assessment of the influence of innovative solutions to the technical and operational characteristics of individual mechanisms and systems on the reliability of the sock automatic machine on a posteriori information about failures in production.

Methodology: the method of search, description, analogies and analysis of information is used to audit the set of possible solutions to the subject of research, the basics of reliability theory, methods for assessing reliability indicators based on experimental data, matrix theory, elements of numerical methods and methodology of a posteriori reliability analysis of structurally complex technical systems.

Findings: the calculation algorithm and mathematical support for operational assessment of influence of technical and operational changes of one of mechanisms on reliability of the sock automatic machine as a whole in the conditions of uncertainty of the information about failures and sources of its receipt are presented. The advantages of the proposed approach in comparison with the traditional one are shown, which allows to reduce the design duration while ensuring the required quality and minimizing costs by limiting tests and calculations. A numerical estimate of the degree of influence on the reliability of the sock automatic machine of changes in the design of the knitting mechanism is obtained. It is shown that the increase in the average failure time to 24.82 hours, when changing the technical characteristics of the knitting mechanism leads to an increase in this indicator for the machine as a whole to 1.24 hours.

Originality: it is the further development of the theory and methodology of reliability analysis of sock automatic machines at the stages of design or modernization in cases of controlled variety of options for innovative mechanisms with limited information about failures and while maintaining functional and structural relationships.

Practical value: the method of modeling the reliability of the sock automatic machine according to the innovative solutions of its mechanisms is proposed, which minimizes the costs of additional tests and calculations. The results of the above concept of the analysis of the reliability of the machine confirmed the sufficient accuracy of the calculations at the stage before the design preparation, which allows it to be used for other knitting machines.

Keywords: sock automatic machine, innovation, reliability, designing, calculation, posteriori information.

УДК 641.546.44:
681.5

ЛАЖЕНКО А.С., БІЛА Т.Я.

Київський національний університет технологій та дизайну

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МОТОР-КОМПРЕСОРОМ ПОБУТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

Мета. Визначення раціональної структури системи автоматичного керування мотор-компресором, що забезпечує мінімальні втрати енергії при вмиканні та виході на усталений режим роботи побутового холодильника.

Методика. У роботі використано методи імітаційного моделювання, порівняльного аналізу, дослідження систем керування та основні положення технічної термодинаміки і теорії автоматичного управління.

Результати. У роботі розглянуто принцип дії холодильного агрегату побутового холодильника, схематично показані його основні елементи і взаємозв'язок з парокомпресійним циклом. Розроблено імітаційні моделі систем автоматичного керування на основі пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, нечіткого та гібридного регуляторів. Запропоновані моделі дозволяють оцінити якість керування температурою в холодильному відділенні та визначати втрати енергії під час перехідних процесів. Приведено результати комп'ютерного моделювання перехідних процесів в системах керування температурою за рахунок зміни продуктивності мотор-компресора та отримані значення втрат електроенергії. Встановлено, що найменші втрати електроенергії при миттєвому збільшенні теплоприпливів в холодильне відділення відбуваються при застосуванні нечіткого регулятора. Визначено, що використання нечітких регуляторів в системах автоматичного керування зменшує тривалість перехідних процесів, час першого узгодження, кількість коливань, але призводить до виникнення статичної помилки та збільшує величину максимального відхилення від заданої температури в холодильному відділенні побутового холодильника.

Наукова новизна. Розроблено імітаційні моделі систем керування роботою мотор-компресора побутового холодильника для оцінки якості регулювання та визначення втрат електроенергії під час перехідних процесів.

Практична значимість. Запропоновані шляхи підвищення енергоефективності побутових холодильників за рахунок впровадження систем керування з нечіткими регуляторами.

Ключові слова: нечітка логіка, регулятор, імітаційна модель, перехідний процес, парокомпресійний цикл.

Вступ. Електропобутова техніка стала незамінним помічником в діяльності людини і дозволяє значно скоротити час виконання домашньої роботи та істотно її полегшити [1]. При цьому холодильник являється найважливішим приладом в сучасному побуті кожної сім'ї, який забезпечує якісне та тривале зберігання продуктів харчування, використовуючи функції охолодження та заморожування. В побутовій техніці використовують компресійні, термоелектричні та абсорбційні холодильники [1]. Завдяки своїм техніко-економічним показникам найбільше розповсюдження отримали побутові компресійні холодильники. Сучасні компресійні холодильники працюють у повторно-короткочасному режимі, вмикаючи та вимикаючи двигун компресора від джерела живлення. Такий режим роботи призводить до підвищених навантажень на виконавчий двигун під час пуску та збільшенню енерговитрат [2-4]. Для переходу від повторно-короткочасного режиму роботи розроблені інверторні системи керування, які дозволяють виконавчим двигунам постійно знаходитися

під напругою, регулюючи при цьому частоту напруги живлення мотор-компресора [5]. Подальшим напрямом вдосконалення систем регулювання є впровадження регуляторів, що дозволяють якісно покращити перебіг перехідних процесів та підвищити енергоефективність системи в цілому.

Постановка завдання. На сьогодні більша частина побутових компресійних холодильників має систему регулювання на базі релейної логіки [6]. Інверторні системи регулювання поступово входять в сучасний побут. Це пов'язано з ціною кінцевого приладу та довговічністю холодильників з релейною системою керування. Але недоліком таких систем є підвищене споживання електроенергії на охолодження продуктів внаслідок дії багатьох зовнішніх факторів. До найважливіших з них можна віднести кількість (масу) продуктів, що завантажуються в холодильну камеру, їх температуру, вологість, а також температуру навколишнього середовища. Метою даного дослідження є визначення впливу нечіткого регулятора в нелінійній стаціонарній термодинамічній системі та аналіз втрат енергії холодильного агрегату під час «холодного пуску» при використанні різних регуляторів холодопродуктивності мотор-компресора на основі імітаційного моделювання.

Результати дослідження. З точки зору здійснення імітаційного моделювання впливу системи автоматичного керування на ефективність роботи мотор-компресора розглянемо принцип роботи та створимо структурно-функціональну схему холодильника.

Принцип роботи компресійного холодильника заснований на тому, що робоче тіло (холодоагент) за рахунок витрати зовнішньої роботи здійснює зворотний круговий термодинамічний процес - парокompresійний цикл (ПКЦ) (рис. 1) [7].

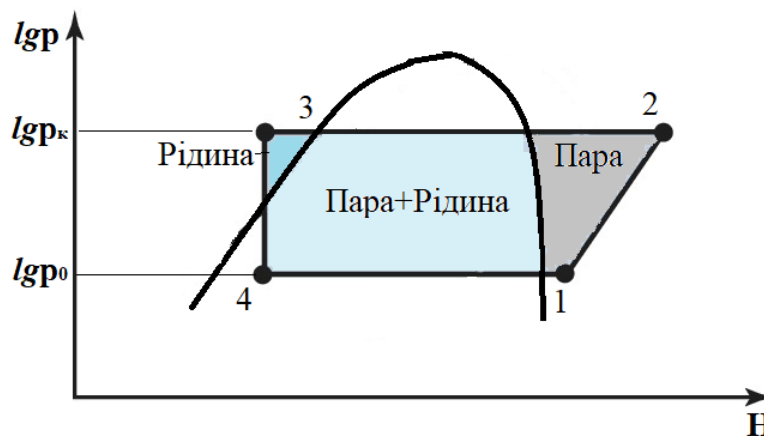


Рис. 1. Парокompresійний цикл в координатах $\lg p$ - H (тиск - ентальпія)

ПКЦ реалізується за допомогою чотирьох елементів, які утворюють замкнений холодильний контур. На рис. 2 ці елементи позначені: М-К – мотор-компресор, К – конденсатор, ТРВ – терморегулюючий вентиль, В – випарник. В ПКЦ холодоагент спочатку стискається компресором (М-К) до певного тиску (точка 1 на рис. 1), внаслідок чого його температура підвищується, потім охолоджується в конденсаторі за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем (точка 2). Далі стиснутий і холодний холодоагент розріджується та переохолоджується в ТРВ (точка 3) та випаровується у випарнику (точка 4) з відбиранням теплоти від продуктів, що охолоджуються.

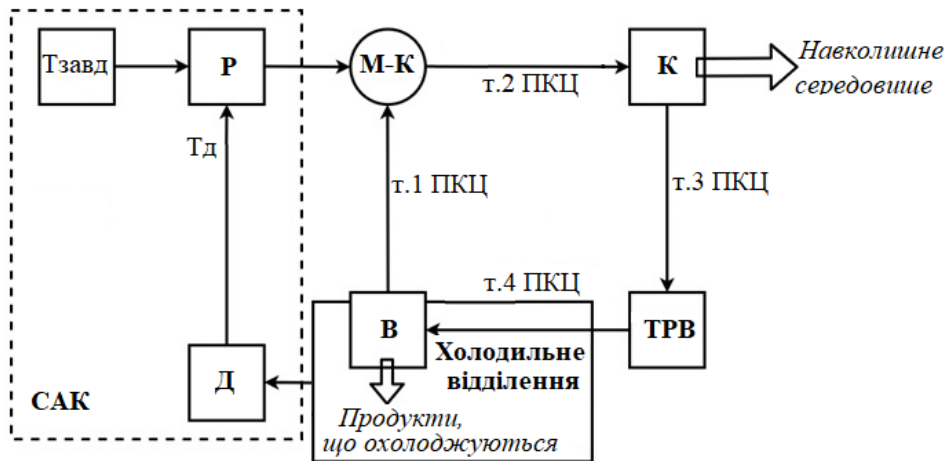


Рис. 2. Структурно-функціональна схема холодильника

Система автоматичного керування (САК) складається з регулятора Р, датчика Д дійсної температури в холодильному відділенні T_d і задавача температури $T_{завд}$ (рис. 2). Для проведення комп'ютерного експерименту імітаційна модель повинна відповідати розробленій схемі холодильника (рис. 2). Використаємо імітаційну модель холодильного агрегату [8], яка реалізована за допомогою засобів програмного середовища MATLAB/Simulink/SimScape.

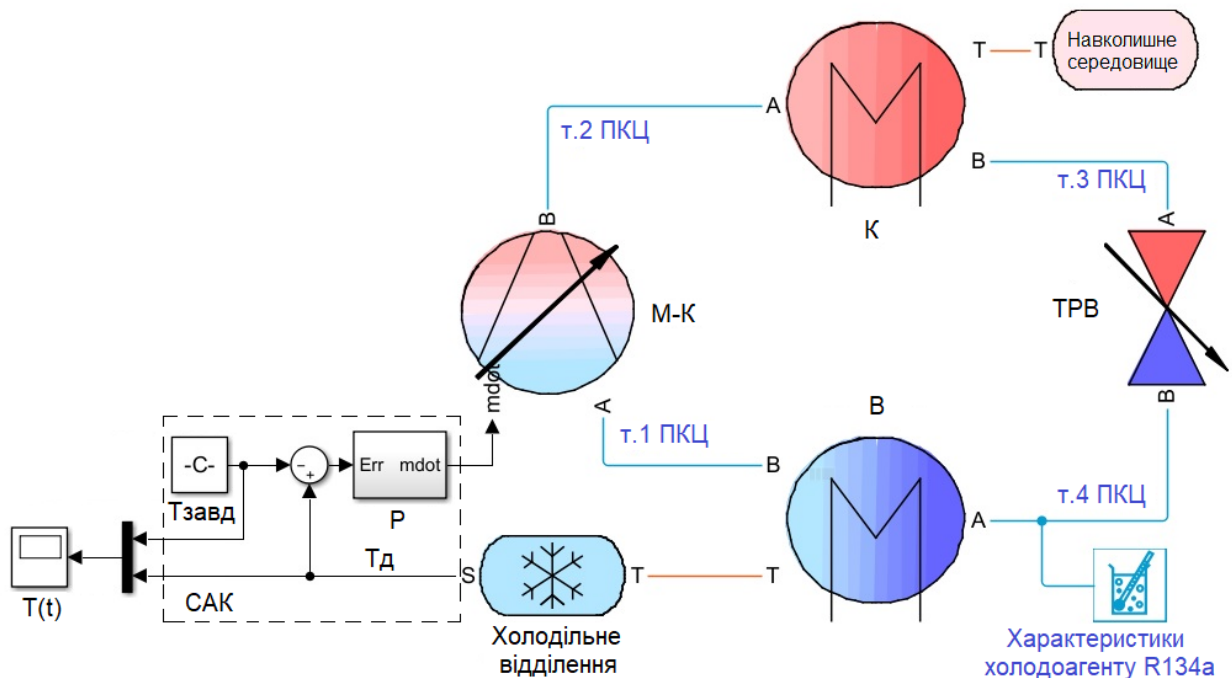


Рис. 3. Імітаційна модель холодильника

Для виконання комп'ютерного моделювання задаємо наступні умови:

- приймаємо, що мотор-компресор інверторного типу описується коливальною ланкою другого порядку;

- регулювання здійснюється за температурою в холодильному відділенні T_d ;
 - вихідною величиною регулювання є холодопродуктивність компресора;
 - холодильне відділення має об'єм $0,25 \text{ м}^3$, в якому миттєво збільшена величина теплоприпливів за рахунок розміщення ємності з водою (приймаємо масу $3,8 \text{ кг}$) та потрапляння повітря з навколишнього середовища (приймаємо $0,3 \text{ кг}$) температурою 293 К ;
 - задана температура в холодильній камері становить $T_{завд} = 277 \text{ К}$.
- В даній моделі компресор заданий передаточною функцією, що має вигляд:

$$Wk(p) = \frac{\left(\frac{9}{T_k}\right)^2}{p^2 + 2 \cdot \left(\frac{9}{T_k}\right)p + \left(\frac{9}{T_k}\right)^2} \quad (1)$$

де p – оператор диференціювання;

$T_k = 20 \text{ с}$ – постійна часу компресора.

Для виконання експериментальних досліджень в системі автоматичного керування (рис. 2, 3) використаємо три типи регуляторів: ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний), нечіткий та гібридний регулятори.

ПІД-регулятор складається з пропорційної (K_p), інтегральної ($\frac{K_i}{p}$) і диференціальної (K_{dp}) ланок, кожна з яких має власний коефіцієнт передачі. На рис. 4 представлена досліджувана система автоматичного керування інверторним холодильником з ПІД-регулятором.

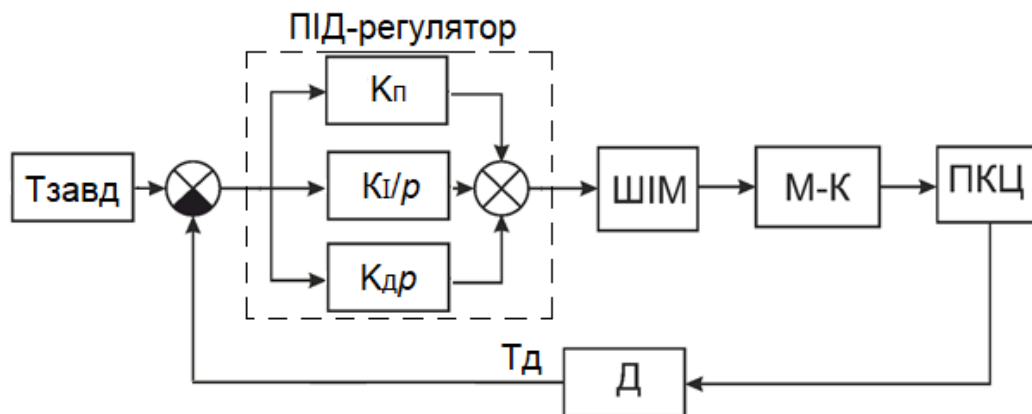


Рис. 4. Структурна схема САК з ПІД-регулятором

В системі дійсна температура T_d в холодильному відділенні порівнюється зі заданим значенням температури $T_{завд}$. Суматор ПІД-регулятора підсумовує сигнали $Y_p(t)$, $Y_i(t)$ і $Y_d(t)$ та формує вихідний сигнал $Y(t)$:

$$Y(t) = Y_p(t) + Y_i(t) + Y_d(t) = K_p \cdot \delta(t) + K_i \cdot \int_0^t \delta(t) dt + K_d \cdot \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (2)$$

де $\delta(t) = T_d(t) - T_{завд}(t)$ – сигнал відхилення дійсної температури від заданої (сигнал неузгодження);

t – час.

Блок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) слугує для перетворення вихідного сигналу регулятора в силовий керуючий сигнал, що дозволяє змінювати продуктивність компресора.

Оскільки побутовий холодильник являється складною нелінійною системою, тоді доцільно включати до системи керування нелінійні пристрої, до яких відносяться нечіткі регулятори [9, 10]. Для системи регулювання температури з використанням нечіткої логіки вхідними величинами є величина неузгодженості температур $\delta(t)$ і похідна від неї (тобто швидкість її зміни) (рис. 5). Ці сигнали спочатку перетворюються у нечіткий формат (блок фазифікації 1), обробляються за допомогою набору правил нечіткої логіки 3 та перетворюються у логічний висновок 2 (нечіткий сигнал). Потім за допомогою блоку дефазифікації 4 нечіткий сигнал перетворюється у сигнал керування.

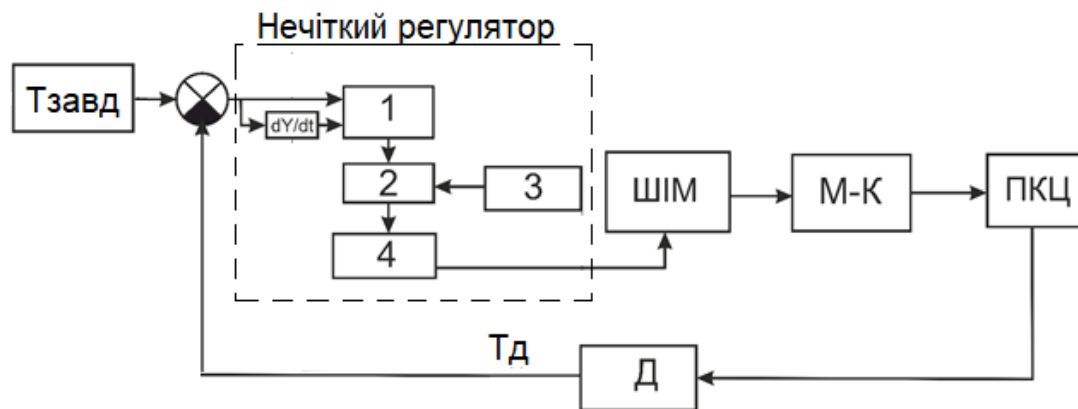


Рис. 5. Структурна схема САК з нечітким регулятором

Гібридний регулятор складається з послідовно з'єднаних ПІД-регулятора та регулятора на базі нечіткої логіки. Структурна схема гібридного регулятора зображена на рис. 6.

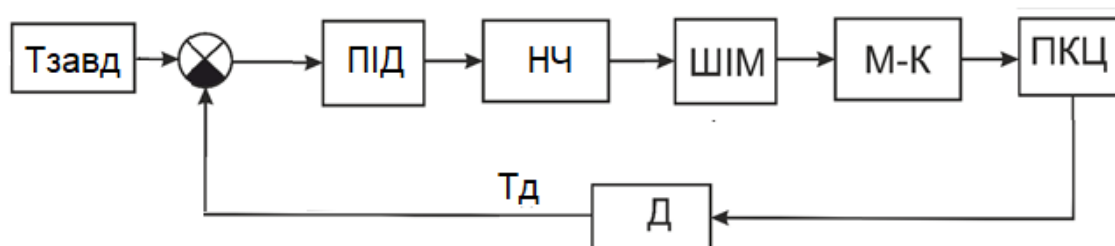


Рис. 6. Структурна схема САК з гібридним регулятором

Для того, щоб перевірити ефективність розглянутих вище регуляторів за допомогою комп'ютерного моделювання, проведено ряд експериментів і встановлено наступні параметри передаточної функції (2) ПІД-регулятора (рис. 7):

$$W(p) = -2.63 \cdot e(t) + -0.005 \cdot \int_0^t e(t) dt + -50 \cdot \frac{de(t)}{dt} \cdot \frac{48}{1 + 48 \cdot \frac{1}{\int_0^t e(t) dt}} \quad (3)$$

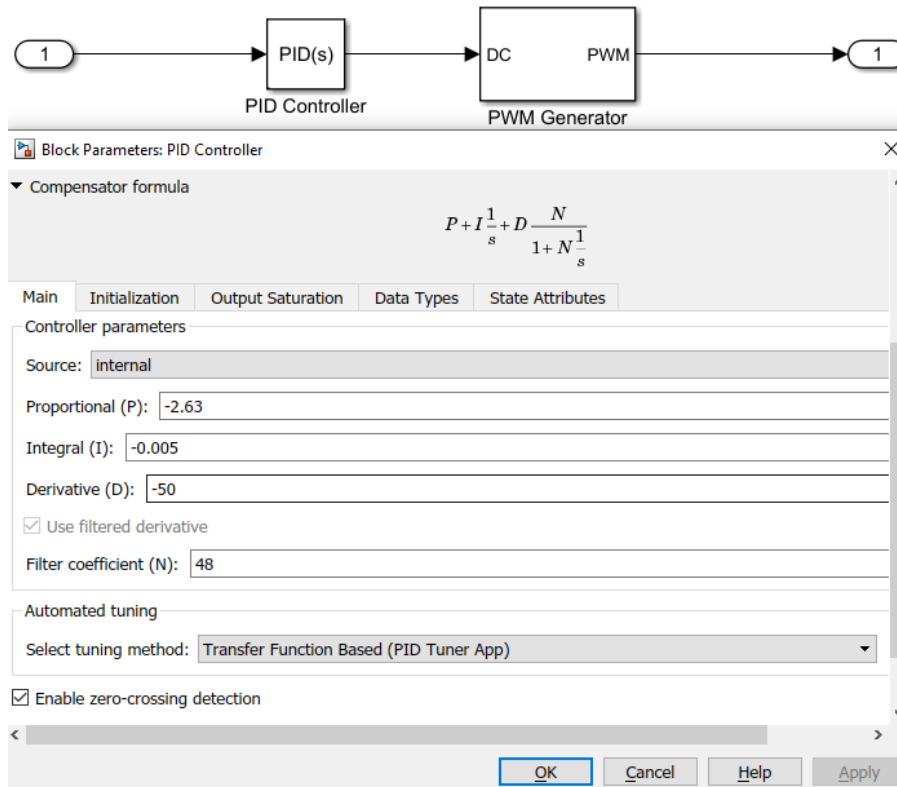


Рис. 7. Імітаційна модель та вікно налаштувань ПІД-регулятора

Імітаційна модель підсистеми «Система регулювання» з нечітким регулятором приведена на рис. 8 і складається з блоків Derivative, що являється ідеальною диференційною ланкою та блоку Fuzzy Logic Controller, що містить терми та правила нечіткої логіки. Працює система наступним чином. На вхід нечіткого регулятора надходять два сигнали: перший – різниця температур, другий – похідна від різниці температур, тобто швидкість змінювання температури. Блок Fuzzy Logic Controller налаштований на 47 правил нечіткої системи.

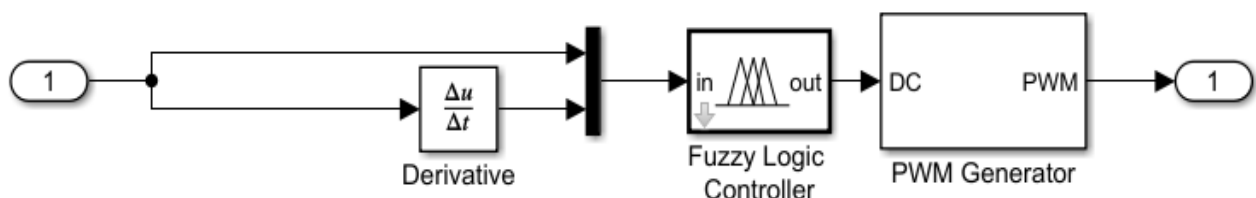


Рис. 8. Імітаційна модель нечіткого регулятора

Імітаційна модель гібридного регулятора представлена на рис. 9.

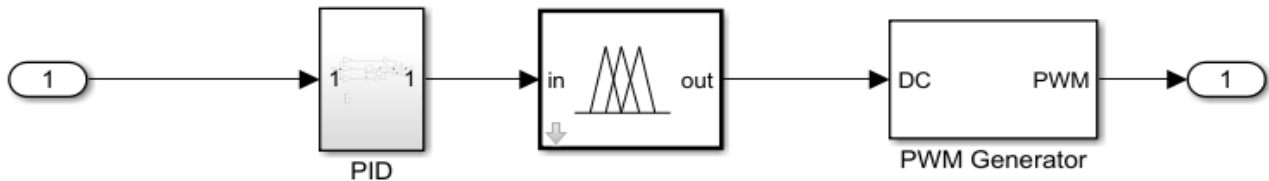


Рис. 9. Імітаційна модель гібридного регулятора

Для отримання значень втрат енергії на охолодження скористаємося формулою знаходження витрат теплового потоку Q для перехідного (нестационарного) процесу:

$$dQ = (c_{\text{пов}} \cdot m_{\text{пов}} + c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}}) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (4)$$

де $c_{\text{пов}}$ та $c_{\text{в}}$ – питомі теплоємності повітря та води, відповідно ($c_{\text{пов}} = 1012 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $c_{\text{в}} = 4187 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$); $m_{\text{пов}}$ і $m_{\text{в}}$ – маси повітря і води, відповідно (за умовою $m_{\text{пов}} = 0,3 \text{ кг}$, $m_{\text{в}} = 3,8 \text{ кг}$); τ – тривалість перехідного процесу.

Вдосконалюємо імітаційну модель (рис. 3) для визначення втрат енергії протягом перехідного процесу. З цією метою під'єднаємо інтегруючу ланку та два підсилювачі для виконання операції множення на суму добутків мас і теплоємностей та ділимо на $3,6 \cdot 10^6$ для отримання значень в кВт·год. Підключаємо блок Display, на який буде виведене числове значення в кВт·год.

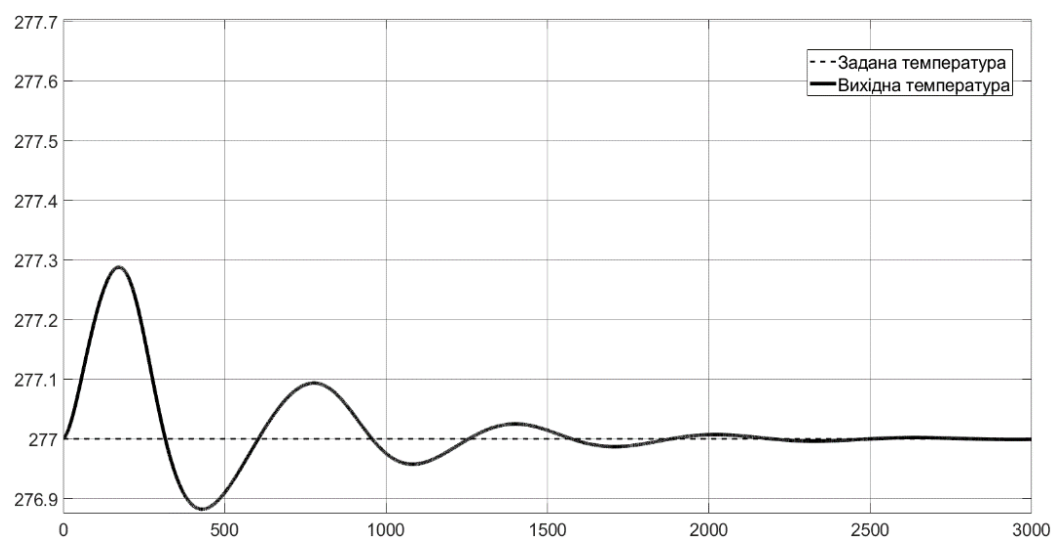
Отримані графіки комп'ютерних досліджень процесів змінювання температури в холодильному відділенні на імітаційній моделі (рис. 3) з різними типами регуляторів (моделі рис. 7-9) представлені на рис. 10.

Результати комп'ютерних досліджень представлені в таблиці.

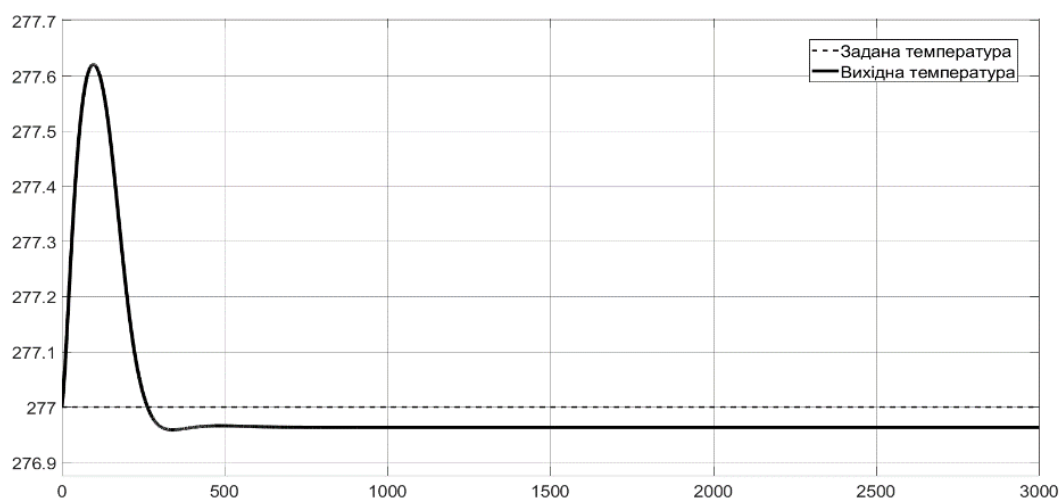
Таблиця

Результати комп'ютерних досліджень

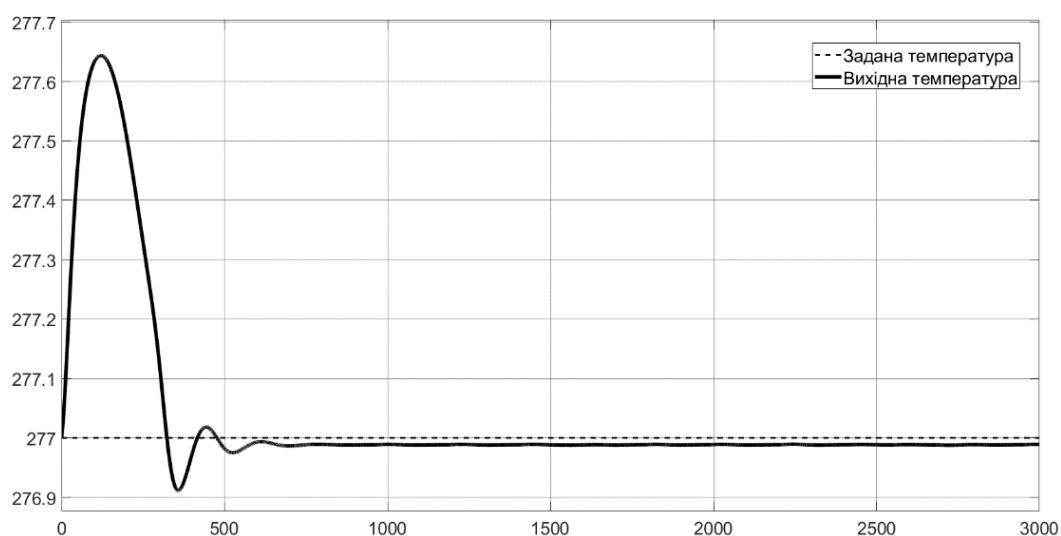
Параметр	Тривалість перехідного процесу τ , с	Максимальне відхилення температури δ , °C	Час першого узгодження, с	Кількість коливань	Статична помилка, °C	Втрати електроенергії, кВт·год
Тип регулятора						
ПІД	2200	0,3	340	4	Відсутня	0,086
Нечіткий	500	0,66	260	1	-0,036	0,045
Гібридний	750	0,64	340	3	-0,01	0,078



а)



б)



в)

Рис. 10. Зміювання температури в холодильному відділенні при використанні регуляторів: а) ПД; б) нечіткого; в) гібридного

Висновки:

1) Запропоновані імітаційні моделі дозволяють оцінити якість керування мотор-компресором за температурою в холодильному відділенні побутового холодильника з застосуванням трьох типів регуляторів та визначити втрати енергії під час перехідних процесів.

2) Встановлено, що найменші втрати електроенергії при миттєвому збільшенні теплоприпливів в холодильне відділення відбуваються при застосуванні нечіткого регулятора.

3) Використання нечітких регуляторів в САК мотор-компресором побутового холодильника зменшує тривалість перехідних процесів, час першого узгодження, кількість коливань, але призводить до виникнення статичної помилки та збільшує величину максимального відхилення від заданої температури.

Література

1. Електропобутова техніка: підручник / І. В.Петко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, М. Є. Скиба. – Хмельницький: ХНУ, 2017. – 213 с.
2. Електричні машини та електропривод побутової техніки: підручник / [М. Г. Попович, Л. Ф. Артеменко, О. П. Бурмістенков та ін.]. – Київ: Либідь, 2004. – 352 с.
3. Вынгра А. В. Модернизация модели судовых холодильных установок применением нечеткой логики для регулирования температуры / А. В. Вынгра. // Вестник АГТУ. – 2017. – С. 60–68.
4. Онищенко О. А. Модернизация управляемых электроприводов герметичных компрессоров / О. А. Онищенко, А. Ю. Букарос. // ОНПУ. – 2010– С. 58.
5. Shen B. Control of Air-Conditioner With Inverter Using Evaporating Pressure as Middle-Target Via Fuzzy Method [Електронний ресурс] / B. Shen, Z. Su. – 2000. – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1514&context=iracc>.
6. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Мацько Б. М. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб./ Под ред. М. Г. Поповича – К.: Либідь, 2013. – 680 с.
7. Кудинов В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2003. – 261 с.

References

1. Petko I.V, Burmistenkov O. P., T. Ya. Bila, M & Skyba Ye. (2017). Elektropobutova tekhnika [Electrical household appliances]. Khmelnytskyi: KhNU. [in Ukrainian]
2. М. Н. Popovych, L. F. Artemenko, O. P. Burmistenkov & others (2004).Elektrychni mashyny ta elektropyvod pobutovoi tekhniky [Electric machines and electric drive of household appliances]. Kyiv: Lybid.[in Ukrainian]
3. Vyngra A. V (2017). Modernizatsiya modeli sudovykh kholodil'nykh ustanovok primeneniem nechetkoy logiki dlya regulirovaniya temperatury[Modernization of the model of ship refrigeration units using fuzzy logic for temperature control]. Kerch: Vestnik AGTU. 60-68 [in Russian]
4. Onishchenko O. A & Bukaros A. Yu. (2010). Modernizatsiya upravlyaemykh elektropyvodov germetichnykh kompressorov[Modernization of controlled electric drives of hermetic compressors]. Odessa: ONPU. 58 [in Russian].
5. Shen B (2000). Control of Air-Conditioner With Inverter Using Evaporating Pressure as Middle-Target Via Fuzzy Method. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, paper 515. Retrieved from: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1514&context=iracc> Applied mechanics, 7 (75), V 3, 34-38. Retrieved from: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/44236/41479> [in Russian].
6. Popovych M.H., Lozynskyi O.Yu., Matsko B.M. & others (2013). Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropyvody[Electromechanical automatic control systems and electric drives]. Kyiv.: Lybid.[in Ukrainian].
7. Kudinov V.A. & Kartashov E.M. (2003). Tekhnicheskaya termodinamika[Technical

8. Two-Phase Fluid Refrigeration (Комп'ютерна модель холодильного циклу для середовища MATLAB/Simulink) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/two-phase-fluid-refrigeration.html>

9. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

10. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. / С. Д. Штовба. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

thermodynamics]. Moscow: Vysshaya shkola[in Russian].
8. Mathworks.com. 2020. Two-Phase Fluid Refrigeration-MATLAB & Simulink. Retrieved from: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/two-phase-fluid-refrigeration.html>.

9. Leonenkov A.V.(2005). Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH[Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg[in Russian].

10. Shtovba S. D.(2007). Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB[Designing Fuzzy Systems Using MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom[in Russian]

LAZHENKO ARTEM

e-mail: lazhenko.artem@gmail.com

Institute of Engineering and Information Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design

BILA TETYANA

e-mail: bila.ty@knutd.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>

Researcher ID: T-5276-2018

Institute of Engineering and Information Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОТОР-КОМПРЕССОРОМ ХОЛОДИЛЬНИКА

ЛАЖЕНКО А.С., БЕЛАЯ Т.Я.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Определение рациональной структуры системы автоматического управления мотор-компрессором, который обеспечивает минимальные потери энергии при включении и выходе на установившийся режим работы бытового холодильника.

Методика. В работе использованы методы имитационного моделирования, сравнительного анализа, исследования систем управления и основные положения технической термодинамики и теории автоматического управления.

Результаты. В работе рассмотрены принцип действия холодильного агрегата бытового холодильника, схематически показаны его основные элементы и взаимосвязь с пароконденсационным циклом. Разработаны имитационные модели систем автоматического управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, нечеткого и гибридных регуляторов. Предложенные модели позволяют оценить качество управления температурой в холодильном отделении и определять потери энергии во время переходных процессов. Приведены результаты компьютерного моделирования переходных процессов в системах управления температурой за счет изменения производительности мотор-компрессора и полученные значения потерь электроэнергии. Установлено, что наименьшие потери электроэнергии при мгновенном увеличении теплопритоков в холодильное отделение происходят при применении нечеткого регулятора. Определено, что использование нечетких регуляторов в системах автоматического управления уменьшает продолжительность переходных процессов, время первого согласования, количество колебаний, но приводит к возникновению статической ошибки и увеличивает величину максимального отклонения от заданной температуры в холодильном отделении бытового холодильника.

Научная новизна. Разработаны имитационные модели систем управления работой мотор-компрессора бытового холодильника для оценки качества регулирования и определения потерь электроэнергии во время переходных процессов.

Практическая значимость. Предложены пути повышения энергоэффективности бытовых холодильников за счет внедрения систем управления с нечеткими регуляторами.

Ключевые слова: нечеткая логика, регулятор, имитационная модель, переходный процесс, парокомпрессионный цикл.

EVALUATION OF MOTOR-COMPRESSOR ENERGY EFFICIENCY USING CONTROL SYSTEMS OF A HOUSEHOLD REFRIGERATOR

LAZHENKO A, BILA T.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Determining the rational structure of the automatic control system of the motor-compressor, which provides minimal energy losses when switching on and going to a steady state mode of operation of a household refrigerator.

Methodology. The methods of simulation modeling, comparative analysis, research of control systems and the main provisions of technical thermodynamics and the theory of automatic control are used in the work.

Findings. The paper considers the principle of operation of the refrigeration unit of a household refrigerator, schematically shows its main elements and the relationship with the steam compression cycle. Simulation models of automatic control systems based on proportional-integral-differential controller, fuzzy and hybrid controllers have been developed. The proposed models allow to evaluate the quality of temperature control in the refrigeration compartment and to determine energy losses during transients. The results of computer simulation of transients in temperature control systems due to changes in the performance of the motor-compressor and the obtained values of power losses are presented. It is established that the smallest losses of the electric power at instant increase of heat inflows in refrigerating department occur at application of a fuzzy regulator. It is determined that the use of fuzzy controllers in automatic control systems reduces the duration of transients, the time of the first negotiation, the number of oscillations, but leads to static error and increases the maximum deviation from the set temperature in the refrigerator compartment.

Originality. Simulation models of control systems of the motor-compressor of a household refrigerator for assessment of quality of regulation and definition of losses of the electric power during transient processes are developed.

Practical value. The ways to increase the energy efficiency of household refrigerators through the introduction of control systems with fuzzy regulators are proposed.

Key words: fuzzy logic, regulator, simulation model, transient process, vapor-compression cycle.

УДК 621.777.4

ГРУДКІНА Н. С.

Донбаська державна машинобудівна академія

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО РАДІАЛЬНО-ПРЯМОГО ВИДАВЛЮВАННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬОВАНИХ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КІНЕМАТИЧНИХ МОДУЛІВ

Мета. Розширення можливостей методу кінематичних модулів для визначення величини приведенного тиску деформування та формоутворення напівфабрикату в процесах комбінованого радіально-прямого видавлювання складнопрофільованих порожнистих деталей. Отримання розрахункових залежностей, що дозволять прогнозувати дотримання необхідних розмірів деталі та оцінити можливість дефектоутворення.

Методика. Енергетичним методом на основі методу кінематичних модулів проведено дослідження основних факторів, які впливають на силовий режим деформування та особливості формоутворення напівфабрикату в процесах комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії металу.

Результати. На основі енергетичного методу із використанням кінематичного модуля з двома степенями свободи течії металу отримано приведений тиск деформування розрахункової схеми комбінованого радіально-прямого видавлювання складнопрофільованих порожнистих деталей. Отримано залежності приростів напівфабрикату, які дають можливість проаналізувати вплив технологічних факторів на процес формоутворення та можливого дефектоутворення у вигляді утягнення.

Наукова новизна. Підтверджено можливості енергетичного методу із використанням кінематичних модулів з декількома степенями свободи течії металу для оцінки силового режиму та формоутворення напівфабрикату у процесах комбінованого видавлювання. Встановлено суттєвий вплив умов тертя та геометричних параметрів процесу на появу утягнення при комбінованому радіально-прямому видавлюванні складнопрофільованих порожнистих деталей.

Практична значимість. Отримані математичні залежності для розрахунку приведенного тиску деформування та приростів напівфабрикату у процесі комбінованого радіально-прямого видавлювання складнопрофільованих порожнистих деталей, що сприятиме більш активному впровадженню процесів комбінованого видавлювання на виробництві.

Ключові слова: енергетичний метод, комбіноване видавлювання, порожнисті деталі з фланцем.

Вступ. В контексті забезпеченні розвитку економіки України пріоритети визначаються пошуком та розробкою сучасних наукоємних технологій, на противагу класичним способам формоутворення деталей шляхом зняття стружки. В реаліях сьогодення наявність різноманіття методів обробки металів тиском (ОМТ) ставить актуальну задачу вибору найбільш економічно обумовленого [1-4]. Дослідження останніх років ведуться як в напрямку вирішення конкретних практичних завдань [1,2,4], таких і с позиції розвитку теоретичних основ моделювання процесів деформування [3]. Перспективними ресурсозберігаючими технологіями наразі є процеси методів ОМТ, заснованих на холодній пластичній деформації, що дозволяють отримувати заготовки із розмірами і якістю, які наближаються до готових деталей, завдяки чому зменшується або повністю виключається доопрацювання різанням [4-7]. Стійка тенденція до розширення номенклатури і матеріалів деталей, отриманих із застосуванням процесів холодного видавлювання, вказує на

необхідність глибоких досліджень щодо визначення розширення технологічних можливостей цих процесів.

Розвиток процесів холодного видавлювання пов'язаний перш за все із розробкою і освоєнням саме процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Саме ці процеси з одного боку відкривають великі перспективи в виготовленні деталей складної конфігурації із фланцями та відростками різної форми. З іншого боку процеси комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії металу проходять в саморегульованого режимі, що вимагає наявності попередньої оцінки не тільки силового режиму деформування, а і формозміни напівфабрикаті та дотримання необхідних розмірів. Таким чином, розвиток розрахункових моделей, що дозволять вирішити всі ці проблеми, заповнить нестачу рекомендацій щодо можливостей впровадження процесів комбінованого видавлювання на виробництві.

Постановка завдання. Основа частина робіт, присвячених дослідженню процесів комбінованого видавлювання, обмежена скінченно-елементним моделюванням або експериментальним дослідженнями і має вузько профільний характер [8-10]. При цьому основні результати стосуються визначення оптимального силового режиму деформування. Слід зазначити, що з точки зору розширення можливостей способів комбінованого видавлювання актуальними є питанням оцінки деформованого стану та дефектоутворення [3]. На даний час номенклатура на підприємствах машинобудування і приладобудування виробів містить велику кількість порожнистих деталей з фланцями та відростками різної форми. Однак при виготовленні їх комбінованим видавлюванням при певних умовах можливе виникнення дефектоутворення (утягнення, тріщини, складки та ін.), в тому числі невиконання форми і розмірів готового виробу.

Таким чином, рішення задач ефективного прогнозування формоутворення заготовки в процесах комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу заповнить нестачу рекомендацій щодо використання процесів комбінованого видавлювання на виробництві та сприятиме їх більш активному впровадженню.

Результати дослідження. Ефективним теоретичним методом дослідження процесів комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії є енергетичний метод верхньої оцінки. Розвиток енергетичного методу на основі розробки нових кінематичних модулів складної конфігурації продемонстрований у роботах [11-13]. Ці дослідження в рамках використання кінематичних модулів складної конфігурації та двома степенями свободи течії металу вказують на можливості зниження прогнозованих силових режимів та уточнення даних щодо формозміни напівфабрикату.

Одним із основних етапів використання енергетичного методу балансу потужностей можна вважати побудову розрахункової схеми досліджуваного процесу як сукупності кінематичних модулів необхідної конфігурації. Підвищений інтерес до оцінки можливостей саме комбінованого видавлювання вимагає розширення бази уніфікованих кінематичних модулів із декількома степенями свободи течії металу. При цьому запорукою їх успішного використання є отримання аналітичного виразу величини приведенного тиску деформування розроблених кінематичних модулів та аналіз раціональності вбудовуваності в розрахункові схеми із урахуванням різної конфігурації суміжних модулів [11-13]. Це гарантує

оперативність використання даних модулів в рамках використання методу кінематичних модулів, що розглядає розрахункову схему процесу з точки зору елементів із відомими величинами потужності сил деформування, тертя та зсуву. Актуальними на даний час можна вважати кінематичні модулі із двома швидкостями витікання металу у радіальному та поздовжньому напрямках. При цьому кінематичний параметр, що визначає швидкість за поздовжнім напрямком (прямої чи зворотної течії) можна розглядати у вигляді варійованого. Визначення оптимального значення цього параметру надає можливості прогнозування приростів напівфабрикату за ходом процесу деформування.

На підприємствах машинобудування і приладобудування номенклатура виробів містить велику кількість порожнистих деталей з фланцями та відростками різної форми (рис. 1, а). Однак при певних умовах може спостерігатися виникнення дефектоутворення у вигляді утягнення, тріщин, в тому числі відхилення форми і розмірів готового виробу від необхідних (рис. 1, б).



Рис.1. Деталі, отримані комбінованим радіально-поздовжнім видавлюванням:
а) без дефектоутворення; б) з дефектоутворенням

Для розширення можливостей використання процесів холодного видавлювання запропоновано корисну модель на спосіб комбінованого видавлювання для виготовлення порожнистих деталей з профільованою зовнішньою поверхнею [14]. В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення відомого способу для отримання деталей з профільованою зовнішньою поверхнею у вигляді фланця, розташованого у донній частині деталі, тобто розширення технологічних можливостей процесу і номенклатури порожнистих деталей, що виготовляються. Пропонований спосіб дозволяє за рахунок використання прийому додаткового радіального переміщення (видавлювання) металу на другій заключній стадії процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання одержувати складнопрофільовані порожнисті деталі типу стаканів з фланцем на бічній поверхні, розташованим в придонній частині деталі. Спосіб реалізується на устаткуванні, що вміщує здатні до незалежного поздовжнього переміщення (від індивідуальних приводів) робочі інструменти: деформуючі – пуансон 1 і контрпуансон 2; формоутворюючі – матриця, яка вміщує верхню півматрицю 3 і нижню півматрицю 4 діаметру $d_1=2R_1$. Вихідну заготовку 5 діаметру $d_0=2R_0$ розміщують в порожнині матриці (півматриць 3 і 4) до торцю контрпуансону 2 і, впливаючи з швидкістю V_1 пуансоном 1, видавлюють у радіальному (поперечному) напрямку в поперечний зазор (прийомну порожнину), утворений

півматрицями 3 і 4, які установлені таким чином, що величина зазору (висота прийомної порожнини) дорівнює h . У початковій стадії процесу деформований метал тече радіально, а після досягнення периферійної (кутової) зони розвороту або просторового вигину й зіткнення зі стінкою півматриці 4 змінює напрямок течії на пряме (на 90°), тече паралельно осі симетрії, утворюючи прямим видавлюванням стінку деталі і циліндричну порожнисту ділянку. Півматриці 3 і 4 здібні до переміщення вздовж осі симетрії в залежності від потрібної товщини стінки порожнистої деталі і відповідно величини поперечного зазору h , що ними створено (рис.2, а).

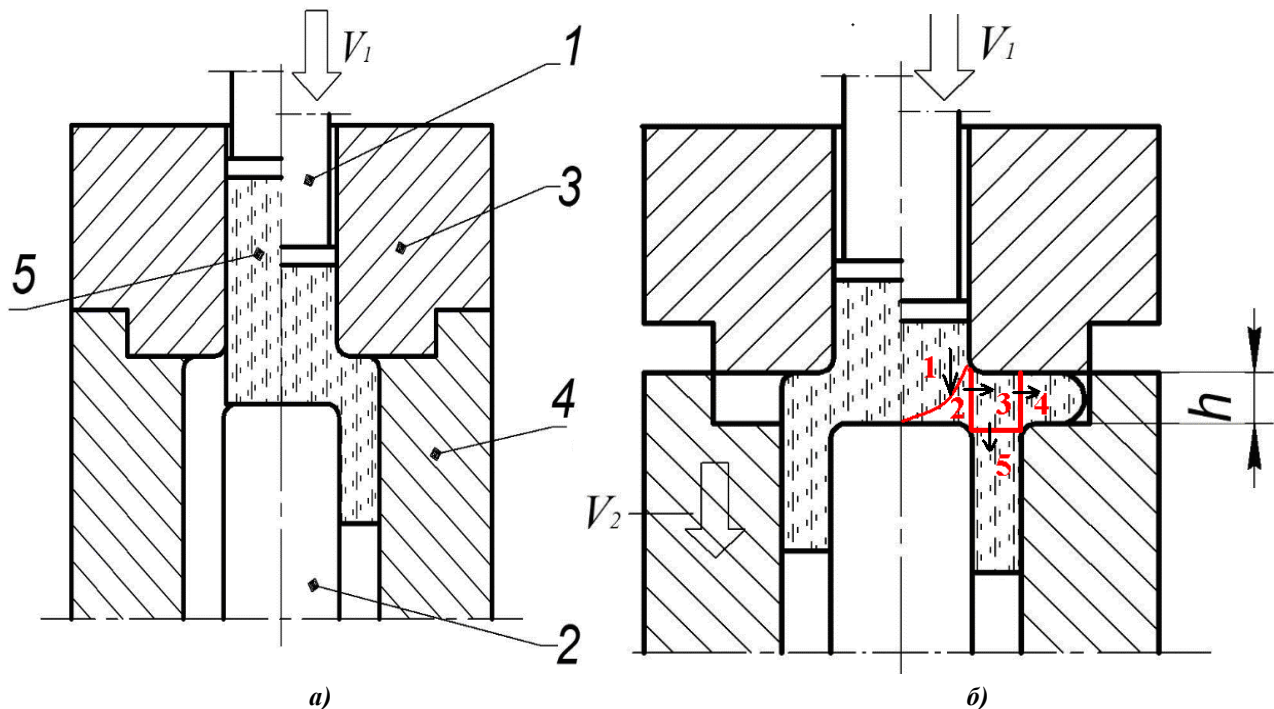


Рис.2. Спосіб комбінованого радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей:
 а) перший етап; б) другий етап

На другого етапі для формування фланця на бічній поверхні деталі й одержання фасонного зовнішнього профілю деталі виконують додаткове радіальне переміщення (видавлювання) металу в зоні розвороту напрямку течії металу (з радіального на прямий), тобто в придонній частині півфабрикату. Для цього змінюють положення півматриці 4 її переміщенням вниз з швидкістю V_2 і створюють додаткову прийомну кругову порожнину в матриці (рис.2, б). Розрахунки енергетичним методом не викликають труднощів. Для другого етапу необхідно провести розрахунки кінематичного модуля 3 (рис. 2, б) з двома степенями течії металу, що описує можливість формування зовнішнього профілю деталі за рахунок радіального видавлювання металу (модуль 4, рис. 2, б) в зоні розвороту напрямку течії металу з радіального на прямий (модуль 5, рис. 2, б). При цьому із урахуванням внутрішнього R_0 та зовнішнього R_1 радіусів кінематичного модуля 3 та його висоти h (товщини фланцевої зони) кінематично можливе поле швидкостей (КМПШ) приймає вигляд:

$$\begin{cases} v_{z3} = \frac{2R_0\lambda v_2}{R_1^2 - R_0^2} (z - h), \\ v_{r3} = \frac{R_0 v_2 (R_1^2 - R_0^2 + \lambda(R_0^2 - r^2))}{(R_1^2 - R_0^2)r}, \end{cases} \quad (1)$$

де $v_2 = \frac{V_0 R_0}{2h}$, $\lambda \in [0,1]$.

Для другого етапу деформування за запропонованим способом комбінованого видавлювання згідно з (1) приведений тиск деформування кінематичного модуля 3 та 4 із урахуванням потужності сил деформування, зсуву та тертя для суміжних модулів 2, 4 і 5 набуває вигляду:

$$\bar{p}_{3-II} = \frac{1}{\sqrt{3}(R_1^2 - R_0^2)} \left[t_2 - t_1 + A \ln \left| \frac{(t_1 + A)R_1^2}{(t_2 + A)R_0^2} \right| + 2(1-\lambda)(R_1^2 - R_0^2) \ln \left(1 + \frac{\Delta l_2}{R_1} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1+2\mu_{s2}}{h} \left((R_1^2 + R_0^2(\lambda-1))(R_1 - R_0) - \lambda \frac{R_1^3 - R_0^3}{3} \right) + hR_1 + \right. \\ \left. + \frac{h}{R_0} |R_1^2 - R_0^2(\lambda-1)| + 4\mu_{s2}(1-\lambda) \frac{R_1^2 - R_0^2}{h} l_2 + 4\mu_{s1}(R_0 + R_1) \Delta l_1 \right], \quad (2)$$

де $A = R_1^2 - R_0^2(1-\lambda)$, $t_1 = \sqrt{3\lambda^2 R_1^4 + A^2}$, $t_2 = \sqrt{3\lambda^2 R_0^4 + A^2}$, Δl_1 та Δl_2 – прирости напівфабрикату у відростку (модуль 5) та зовнішній фланцевій зоні (модуль 4), μ_{s1} та μ_{s2} – коефіцієнти тертя для радіальної складової та відростку відповідно.

Це надає можливості дослідити оптимальне значення параметру λ , що визначає швидкість течії металу при прямому видавлюванні для формування відростку, приведенного тиску деформування $\bar{p}_{3-II}$ та визначити прирости напівфабрикату за ходом процесу за різних технологічних параметрів:

$$\begin{cases} \Delta l_{1i} = \Delta l_{i-1} + \lambda_{i-1} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2 - R_0^2} \cdot \Delta, \\ \Delta l_{2i} = \sqrt{\frac{R_0^2 \Delta H_x - (R_1^2 - R_0^2) \Delta l_{1i}}{h}} + R_1^2 - R_1, \end{cases} \quad (3)$$

де i – номер ітерації, Δ – крок ітерації.

Умови тертя є досить впливовим фактором як на силовий режим (рис. 3, а), так і на формоутворення напівфабрикату (рис. 3, б). Для параметрів процесу $R_0=25$ мм, $R_1=35$ мм, $h=4.5$ мм характер кривих приведенного тиску деформування $\bar{p}_{3-II}$ аналогічний за різних умов, найбільше значення набуває при найгіршому комплексі $\mu_{s1}=\mu_{s2}=0.08$. Прирости напівфабрикату Δl_1 у зоні 5, що формує відросток, демонструють достатньо великий діапазон можливого формоутворення за ідеальних умов тертя у фланцевій зоні та найгірших у зоні

відростку чи навпаки (нижня та верхня криві, рис.3, б). Тому дані технологічні параметри можна вважати такими, що суттєво впливають на формозмінення заготовки. Особливу увагу привертають відмінності у приростах напівфабрикату у зоні відростку за різних товщин фланцевої зони h при зберіганні інших параметрів процесу та умов тертя $\mu_{s1}=\mu_{s2}=0,08$ (рис. 4, а).

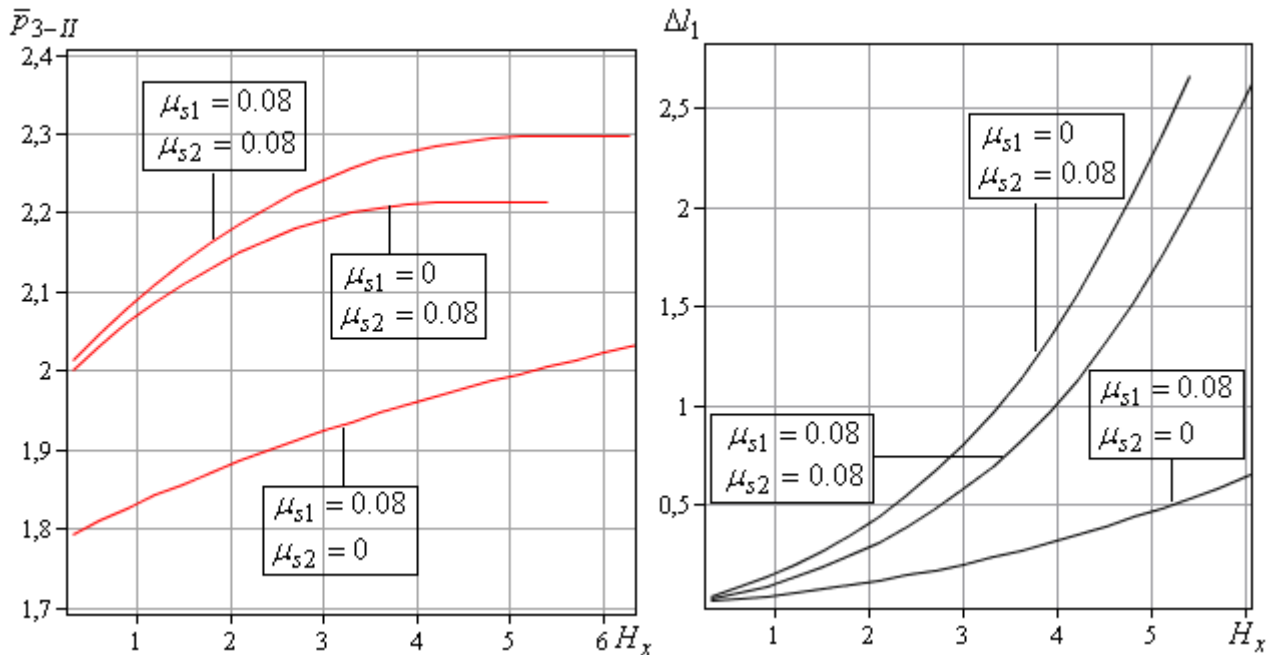


Рис. 3. Залежності силових параметрів та формоутворення від ходу процесу H_x за різних умов тертя: а) приведенного тиску деформування $\bar{P}_{3-II}$; б) приростів відростку Δl_1

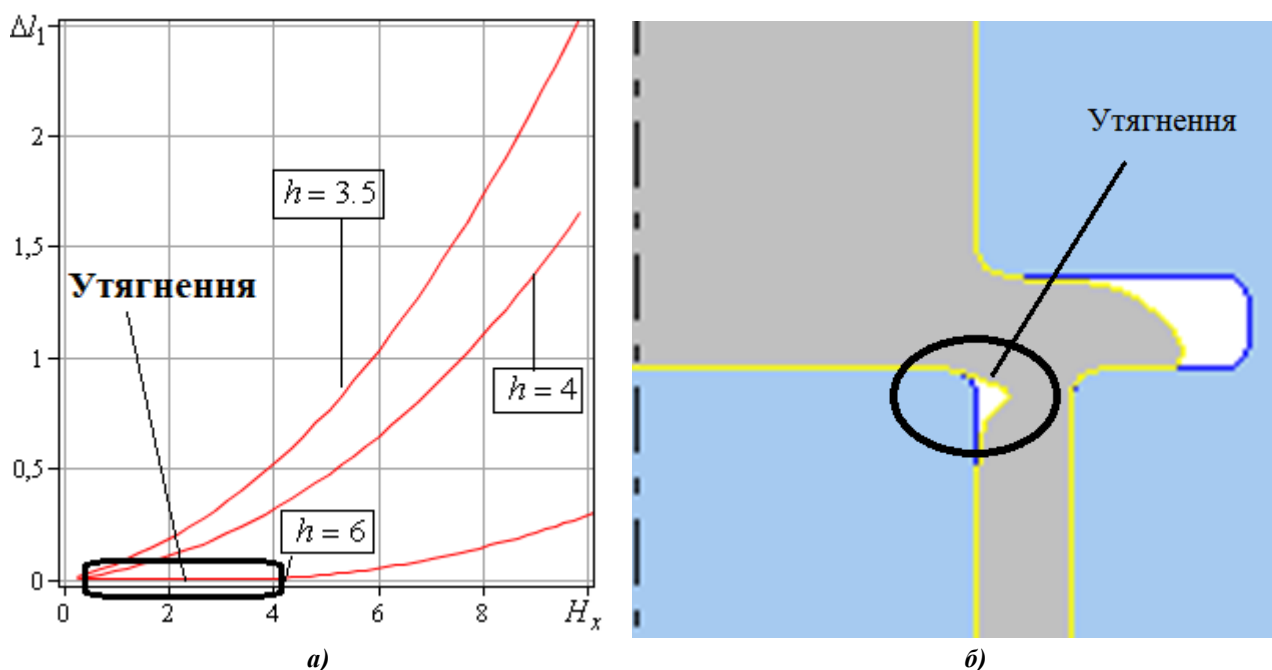


Рис. 4. Формоутворення деталі від ходу процесу із появою утягнення: а) теоретично отримані дані; б) моделювання у Qform2/3d

В результаті розроблений кінематичний модуль 3 дозволяє побудувати розрахункову схему процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання з визначення даних щодо силового режиму та формоутворення напівфабрикату із можливістю визначення появи дефекту у вигляді утягнення.

Таким чином, за допомогою отриманого виразу приведенного тиску деформування (2) та приростів напівфабрикату (3) можна прогнозувати силовий режим та формоутворення (із можливістю дефектоутворення у вигляді утягнення) у процесі комбінованого радіально-прямого видавлювання. Отримані розрахунки дозволяють оцінити можливості використання процесу комбінованого видавлювання за запропонованим способом у два етапи для отримання складнопрофільованих порожнистих деталей типу стаканів з фланцем на бічній поверхні, розташованим в придонній частині деталі.

Висновки. Запропоновано спосіб комбінованого видавлювання для виготовлення складнопрофільованих порожнистих деталей із формуванням на заключному етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні, розташованим в придонній частині деталі. Отримано приведений тиск деформування розрахункової схеми із використанням кінематичного модуля з двома степенями свободи течії металу. Це дозволило отримати дані щодо оцінки оптимального силового режиму деформування від параметру λ , що визначає швидкість течії металу при прямому видавлюванні для формування відростку та формоутворення напівфабрикату. Встановлено суттєвий вплив умов тертя на прирости напівфабрикату та продемонстровано можливості побудованої розрахункової схеми для прогнозування дефектоутворення у вигляді утягнення. Отримані результати свідчать про перспективність використання методу кінематичних модулів для оцінки силового режиму деформування, прогнозування формоутворення напівфабрикату та сприятимуть більш активному впровадженню процесів комбінованого видавлювання на виробництві.

Література

1. Dragobetskii V. Application of explosion treatment methods for production items of powder materials. / Dragobetskii V., Zagirnyak V., Shlyk S., Shapoval A., Naumova O. // Przegląd Elektrotechniczny – 2019. – Vol. 5 (95). – P. 39-42. DOI: 10.15199/48.2019.05.10;
2. Markov O. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. / Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. // EUREKA: Physics and Engineering – 2019. – No. 2. –P. 52–60. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00877;
3. Ogorodnikov V.A. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading / Ogorodnikov, V.A., Dereven'ko, I.A., Sivak, R.I. // Materials Science – 2018. – No. 54 (3). – P. 326–332, doi: 10.1007/s11003-018-0188-x;
4. Алиев И.С. Технологические возможности

References

1. Dragobetskii, V., Zagirnyak, V., Shlyk, S., Shapoval, A., Naumova, O. (2019). Application of explosion treatment methods for production items of powder materials. Przegląd Elektrotechniczny. vol. 5 (95), pp. 39-42. DOI: 10.15199/48.2019.05.10. [in English];
2. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L., Shapoval, A. (2019). Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. EUREKA: Physics and Engineering, No. 2, pp. 52–60. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00877. [in English];
3. Ogorodnikov, V.A., Dereven'ko, I.A., Sivak, R.I. (2018). On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading, Materials Science, No. 54 (3), pp. 326–332. doi: 10.1007/s11003-018-0188-x. [in English];
4. Aliev, I.S. (1990). *Tehnologicheskie vozmozhnosti*

- новых способов комбинированного выдавливания / Алиев И.С. // Кузнечно-штамповочное производство – 1990. – № 2. – С. 7–10;
5. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys / Bhaduri A. // Springer Series in Materials Science – 2018. – No. 264. – P. 599-646. doi: [10.1007/978-981-10-7209-3_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13);
6. Perig, A.: Two-parameter Rigid Block Approach to Upper Bound Analysis of Equal Channel Angular Extrusion through a Segal 20-die, Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, Vol. 18, No. 3, pp. 628-638, 2015, doi: 10.1590/1516-1439.004215.
7. Kalyuzhnyi V.L. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts / Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I.G. // Metallurgist – 2017. – Vol. 61, Issue 5-6. – P.359-365. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>;
8. Jafarzadeh H. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process / Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi E. // Materials and Manufacturing Processes – 2010. – No. 25. – P. 857–863;
9. Seo J. M. Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation / Seo J. M. et al. // Key Engineering Materials – 2007. – Vol. 340-341. – P. 649-654;
10. Noh J. Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process / Noh J., Hwang B.B., Le H.Y. // Metals and Materials International – 2015. – Vol. 21. – No.6. – P.1091–1100. doi: 10.1007/s12540-015-5276-y;
11. Aliieva L. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression / Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbakov I., Markov O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2020. – Vol. 2/1 (104). – P.15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>;
12. Hrudkina Natalia S. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules / Hrudkina Natalia S., Aliieva Leila I. // FME Transactions. – 2020. – Vol. 48. – No. 2. – P. 357-363. doi:10.5937/fme2002357H;
13. Hrudkina N. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. / Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirska L. // Eastern-European Journal of
- novyih sposobov kombinirovannogo vyidavlivaniya [Technological possibilities of new methods of combined squeezing], *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* [Forging and stamping production], No 2, pp. 7–10. [in Russian];
5. Bhaduri, A. (2018). Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science. vol. 264, pp. 599-646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13. [in English];
6. Perig, A. (2015). Two-parameter Rigid Block Approach to Upper Bound Analysis of Equal Channel Angular Extrusion through a Segal 20-die, Materials Research-Ibero-American Journal of Materials. Vol. 18, No. 3, pp. 628-638. doi: 10.1590/1516-1439.004215. [in English];
7. Kalyuzhnyi, V.L., Aliieva, L.I., Kartamyshev, D.A. and Savchinskii, I.G. (2017). Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. Metallurgist. Vol. 61, No. 5-6, pp. 359-365. doi:10.1007/s11015-017-0501-1. [in English];
8. Jafarzadeh, H., Zadshakoyan, M., Abdi, Sobbouhi E. (2010). Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. Materials and Manufacturing Processes. No. 25, pp. 857–863. [in English];
9. Seo, J. M. (2007). Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation, *Key Engineering Materials*, vol. 340-341, pp. 649-654. [in English];
10. Noh, J., Hwang, B.B., Le, H.Y. (2015). Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. Metals and Materials International. vol. 21, № 6, pp. 1091–1100. doi: 10.1007/s12540-015-5276-y. [in English];
11. Aliieva, L., Hrudkina, N., Aliiev, I., Zhbakov, I., Markov, O. (2020). Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2/1 (104), P.15–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>. [in English];
12. Hrudkina, Natalia S., Aliieva, Leila I. (2020). Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. FME Transactions. vol. 48, No. 2, pp. 357-363. doi:10.5937/fme2002357H. [in English];
13. Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Markov, O., Sukhovirska, L. (2019). Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a

Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2. – N 5/1 (101). – P. 49–57. <https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232>;

14. Патент №138662, МПК В21К 21/00 (2006). Спосіб комбінованого видавлювання порожнистих деталей / Алієва Л.І., Алієв І.С., Грудкіна Н.С., Левченко В.М., Малій Х.В.; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія – № u201904812; заяв. 06.05.2019; опуб. 10.12.2019, бюл. № 23.

flange. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. vol. 2, N 5/1 (101), pp. 49–57. <https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232>. [in

English];

14. Aliieva L.I., Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Levchenko V.M., Malii Kh.V. (2019). Sposib kombinovanoho vydavliuvannia porozhnistykh detalei [The method of combined extrusion of hollow parts]. Ukrainian patent, no. 138662.

HRUDKINA NATALIA

vm.grudkina@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0914-8875>

Donbass State Engineering Academy

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО РАДИАЛЬНО-ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КИНЕМАТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ГРУДКИНА Н. С.

Донбасская государственная машиностроительная академия

Цель. Расширение возможностей метода кинематических модулей для определения величины приведенного давления деформирования и формообразования полуфабриката в процессах комбинированного радиально-прямого выдавливания полых деталей со сложным профилем. Получение расчетных зависимостей, которые позволят прогнозировать соблюдения необходимых размеров детали и оценить возможность дефектообразования.

Методика. Энергетическим методом на основе метода кинематических модулей проведено исследование основных факторов, влияющих на силовой режим деформирования и особенности формообразования полуфабриката в процессах комбинированного выдавливания с несколькими степенями свободы течения металла.

Результаты. На основе энергетического метода с использованием кинематического модуля с двумя степенями свободы течения металла получено приведенное давление деформирования расчетной схемы комбинированного радиально-прямого выдавливания полых деталей со сложным профилем. Получены зависимости приращений полуфабриката, которые дают возможность проанализировать влияние технологических факторов на процесс формообразования и возможного дефектообразования в виде утяжины.

Научная новизна. Подтверждены возможности энергетического метода с использованием кинематических модулей с несколькими степенями свободы течения металла для оценки силового режима и формообразования полуфабриката в процессах комбинированного выдавливания. Установлено существенное влияние условий трения и геометрических параметров процесса появления утяжины при комбинированном радиально-прямом выдавливании полых деталей со сложным профилем.

Практическая значимость. Получены математические зависимости для расчета приведенного давления деформирования и приращений полуфабриката в процессе комбинированного радиально-прямого выдавливания полых деталей со сложным профилем, что будет способствовать более активному внедрению процессов комбинированного выдавливания на производстве.

Ключевые слова: энергетический метод, комбинированное выдавливание, полые детали с фланцем.

MODELING OF COMBINED RADIAL-FORWARD EXTRUSION OF HOLLOW PARTS WITH A COMPLEX PROFILE BY USING THE METHOD OF KINEMATIC MODULES

HRUDKINA N. S

Donbass State Engineering Academy

Purpose. Expanding the capabilities of the kinematic modules method to determine the value of the relative deformation pressure and shaping of a semi-finished product in the processes of combined radial-forward extrusion such as hollow parts with a complex profile. Obtaining calculated dependencies that will allow predicting compliance with the required dimensions of the part and assessing the possibility of defect formation.

Methodology. Upper bound method based on the method of kinematic modules is defined investigation of the main factors, affecting the power mode of deformation and features in the shaping of a semi-finished product in the processes of combined extrusion with several degrees of metal flow freedom

Results. Based on the upper bound method by using a kinematic module with two degrees of metal flow freedom is determined the value of the relative deformation pressure for make scheme of combined radial-forward extrusion such as hollow parts with a complex profile. The dependences of the increments in the semi-finished product that make it possible to analyze the influence of technological factors in the process of shaping and possible defect formation in the form of dimple are determined.

Scientific novelty. The possibilities of the upper bound method by using kinematic modules with several degrees of metal flow freedom to assess the power mode and shaping of a semi-finished product in the processes of combined extrusion are determined. Significant influence of friction conditions and geometric parameters of the process the appearance of dimple in combined radial-forward extrusion such as hollow parts with a complex profile are considered.

Practical significance. Mathematical relationships for calculating the value of the relative deformation pressure and increments of the semi-finished product in combined radial-forward extrusion such as hollow parts with a complex profile that will contribute to a more active introduction of combined extrusion processes in production are determined.

Key words: upper bound, combined extrusion, hollow parts with flange.

УДК 677.027.625

АСАУЛЮК Т.С., СЕМЕШКО О.Я., САРІБСЬКОВА Ю.Г.,
МЯСНИКОВ С.А., КУЛІШ І.М., ГОРОХОВ І.В.,
СКАЛОЗУБОВА Н.С.

Херсонський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТИРОЛ-АКРИЛОВИХ ПОЛІМЕРІВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ І ГІГІЄНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАВОВНЯНОЇ ТКАНИНИ

Мета. Мета роботи полягає у дослідженні впливу стирол-акрилових полімерних покриттів на зміну фізико-механічних і гігієнічних властивостей бавовняної тканини.

Методика. В якості об'єкту дослідження обрано водні дисперсії стирол-акрилових полімерів (Lacrytex 640, Акратам AS 02.1, Tubifast AS 4010). Обробку бавовняної тканини здійснено методом просочення з варіюванням концентрації досліджуваних полімерів у опоряджувальній ванні від 50 г/л до 150 г/л з наступним сушінням і термофіксацією. Застосовано стандартизовані методики дослідження властивостей текстильних матеріалів. Вплив полімерних покриттів на фізико-механічні властивості бавовняної тканини оцінено за показниками зміни маси, товщини та жорсткості. Гігієнічні властивості опорядженої бавовняної тканини охарактеризовано за показниками гігроскопічності і повітропроникності.

Результати. У роботі наведено результати дослідження залежності фізико-механічних і гігієнічних властивостей бавовняної тканини від виду та концентрації застосованих стирол-акрилових полімерних дисперсій. За результатами експерименту встановлено, що найбільше посилює пружно-еластичні властивості опорядженої тканини акриловий сополімер Lacrytex 640 у всьому досліджуваному діапазоні концентрацій. Визначено, що найбільше зниження повітропроникності характерне для зразків тканини з покриттям на основі дисперсії Акратам AS 02.1. Гігроскопічність бавовняного текстильного матеріалу при підвищенні концентрації досліджуваних стирол-акрилових полімерних дисперсій з 50 г/л до 100 г/л зменшується у незначній мірі (на 2%).

Наукова новизна. Доведено, що стирол-акриловий сополімер Tubifast AS 4010 завдяки утворенню високоеластичної плівки дозволяє забезпечити м'який гриф і високі гігієнічні властивості бавовняної тканини.

Практична значимість. Отримані результати експерименту мають практичне значення при розробці нових опоряджувальних складів полімерних покриттів для текстильних матеріалів.

Ключові слова: стирол-акрилова дисперсія, полімерне покриття, бавовняна тканина, жорсткість, гігроскопічність, повітропроникність.

Вступ. Спеціальні покриття на текстильних матеріалах створюються для надання виробам нових покращених властивостей, таких як водо-, оліє- та брудовідштовхування, захист від дії мікроорганізмів, вогню, світла [1–8].

Метою використання полімерних зв'язуючих є іммобілізація на поверхні тканин функціональних добавок, які не можуть бути зафіксовані іншим способом, а також підвищення стійкості отриманого опорядження до мокрих обробок та хімічного чищення.

Сформовані полімерні покриття не повинні погіршувати гігієнічні та механічні властивості текстильного матеріалу, а також бути стабільними протягом всього терміну експлуатації виробів. Тому до полімерів і полімерних композицій, які застосовують для створення покриттів на текстильних матеріалах, висувається ряд вимог стосовно фізико-хімічних властивостей, а саме показників міцності на розрив, видовження, стійкості до гідролізу та мильно-содової обробки, які визначаються параметрами просторової сітки полімеру. Важливе практичне значення в технології опорядження текстильних матеріалів мають синтетичні акрилати, які утворюють плівку з хорошою адгезією, світлостійкістю,

стійкістю до високих температур, прання і хімічного чищення [9, 10]. У роботі [11] досліджено хімічні та фізико-механічні властивості полімерних плівок на основі стирол-акрилових дисперсій вітчизняної торгової марки Lacrytex та визначено оптимальні склади опоряджувальних композицій. Слід враховувати, що полімерні покриття безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості оброблюваного текстильного матеріалу, такі як жорсткість, міцність, еластичність, а також на зовнішній вигляд виробів. Таким чином, важливою умовою при створенні нових опоряджувальних композицій є визначення зміни фізико-механічних та гігієнічних властивостей апретованих тканин з метою оцінки ефективності використання досліджуваних полімерних матриць для створення покриттів спеціального призначення на текстильних матеріалах різного асортименту.

Постановка завдання. Основним завданням є дослідження впливу полімерних покриттів акрилової природи на фізико-механічні і гігієнічні властивості бавовняної тканини.

Методи дослідження. Формування полімерних покриттів на поверхні текстильного матеріалу здійснено методом просочення зразків тканини у розчинах з різними концентраціями полімерних дисперсій з наступним сушінням при 80°C і термообробкою при 150°C.

Фізико-механічні властивості опорядженого текстильного матеріалу охарактеризовано за показниками приросту маси, товщини та жорсткості. Дослідження жорсткості текстильного матеріалу при вигині проведено на приладі ПТ-2 методом консолі. Жорсткість визначено окремо для зразків, викроєних у поздовжньому та поперечному напрямках. Коефіцієнт жорсткості розраховано як відношення значень жорсткості поздовжнього напрямку до поперечного.

Вплив полімерних покриттів на гігієнічні властивості текстильного матеріалу оцінено за показниками повітропроникності та гігроскопічності. Повітропроникність зразків тканини визначено на приладі марки ВПТМ.2.

Результати дослідження. Дослідження проведено на бавовняній тканині діагональ арт. 0-166 саржевого переплетення поверхневої густини 230 г/м². У якості плівкоутворювачів використано водні дисперсії акрилових сополімерів: Lacrytex 640, Акратам AS 02.1, Tubifast AS 4010.

Результати визначення приросту маси та зміни товщини обробленої тканини в залежності від концентрації полімеру у опоряджувальній ванні представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Вплив полімерних покриттів на фізичні властивості тканини

Обробка	Концентрація, г/л	Приріст покриття, г/м ²	Товщина тканини, мм
Без обробки	0	0	0,90
Lacrytex 640	50	5,94	0,94
	100	8,79	0,94
	150	13,21	0,94
Акратам AS 02.1	50	10,12	0,92
	100	10,85	0,93
	150	15,33	0,94

Продовження таблиці 1

Tubifast AS 4010	50	5,94	0,94
	100	9,94	0,94
	150	13,70	0,94

В результаті аналізу експериментальних даних (табл. 1) встановлено, що найбільший приріст зміни маси тканини з полімерним покриттям спостерігається при використанні дисперсії Акратам AS 02.1 у всьому досліджуваному діапазоні концентрацій. Найменший показник зміни маси тканини характерний при застосуванні Lacrytex 640.

Товщина тканини з полімерним покриттям на основі дисперсії Акратам AS 02.1 збільшується на 2,2–4,4%. Покриття, сформовані з використанням дисперсій Lacrytex 640 і Tubifast AS 4010 збільшують товщину тканини на 4,4% незалежно від застосованої концентрації полімерів.

Враховуючи те, що при опорядженні текстильних матеріалів високий вміст полімерів у просочувальній ванні є економічно недоцільним, подальші дослідження проведено при концентрації полімерних дисперсій до 100 г/л.

Апретування текстильних матеріалів потребує контролю жорсткості тканини, оскільки даний параметр значно впливає на зовнішній вигляд виробів та визначає їх призначення. Тому на наступному етапі роботи було досліджено вплив сформованих полімерних покриттів на жорсткість бавовняної тканини. Отримані показники жорсткості зразків тканини після обробки розчинами з різними концентраціями досліджуваних полімерних дисперсій представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Вплив полімерних покриттів на жорсткість тканини

Обробка	Концентрація, г/л	Жорсткість на вигин, E_I , мкН·см ²		Коефіцієнт жорсткості, K_{EI}
		поздовжній напрямок	поперечний напрямок	
Без обробки	0	10200	2562	3,98
Lacrytex 640	50	27040	13571	1,99
	100	45954	14943	3,08
Акратам AS 02.1	50	16636	8138	2,04
	100	37105	13666	2,72
Tubifast AS 4010	50	10578	2751	3,85
	100	20623	5586	3,69

З метою оцінки впливу концентрації полімерів у просочувальній ванні на зміну жорсткості тканини після апретування на рис. 1 продемонстровано відносне збільшення досліджуваного показника у поздовжньому і поперечному напрямках відповідно.

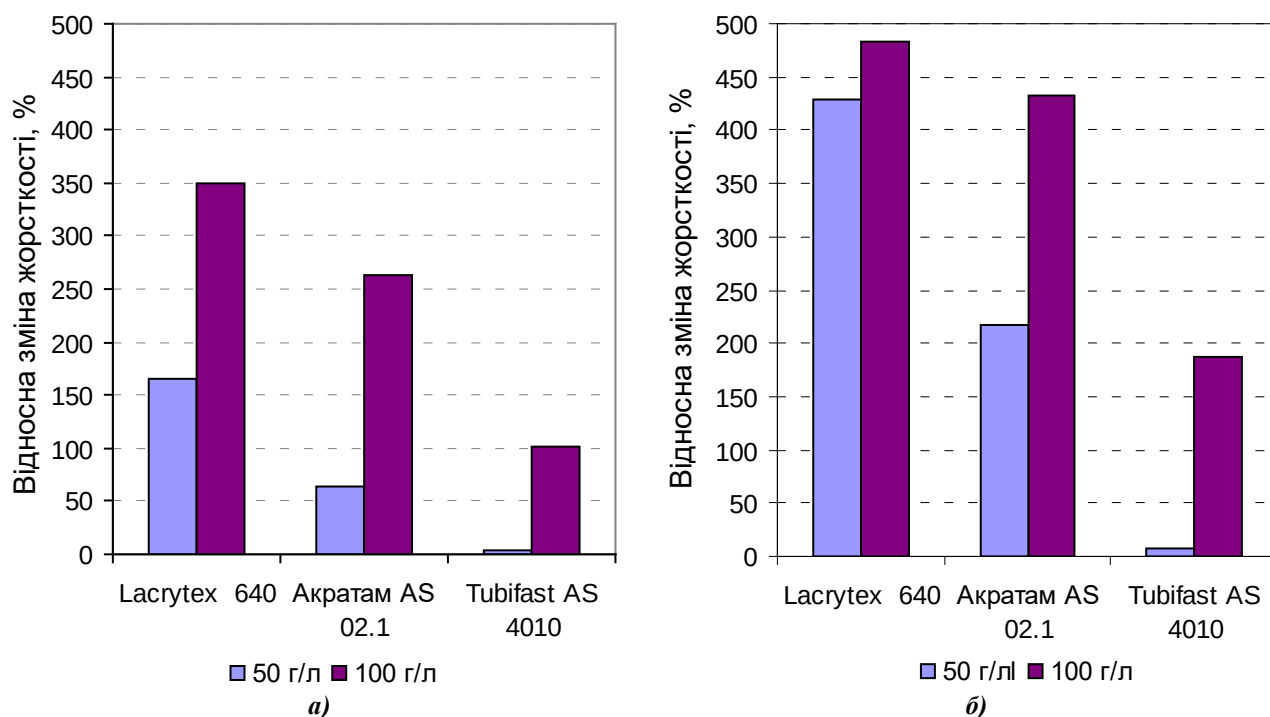


Рис. 1. Відносна зміна жорсткості тканини з полімерним покриттям: а) поздовжній напрям; б) поперечний напрям

Аналіз даних на рис. 1, а) показує, що застосування полімерної дисперсії Lacrytex 640 підвищує жорсткість опорядженої тканини у поздовжньому напрямі на 165,1% при концентрації 50 г/л і на 350,5% при 100 г/л. У разі використання дисперсії Акратам AS 02.1 відбувається підвищення жорсткості в поздовжньому напрямі на 63,1% і на 263,8% при концентраціях полімеру 50 г/л і 100 г/л відповідно. Полімерне покриття, сформоване на основі дисперсії Tubifast AS 4010 при концентрації 50 г/л у просочувальній ванні незначно підвищує жорсткість тканини в поздовжньому напрямі – на 3,7%, а при концентрації 100 г/л жорсткість зразків підвищується на 102,2%.

Аналогічні залежності механічних властивостей тканини від виду та концентрації застосованого полімерного зв'язуючого спостерігаються при визначенні жорсткості зразків у поперечному напрямі (рис. 1, б)). На наступному етапі роботи було оцінено вплив полімерних покриттів на гігієнічні властивості текстильного матеріалу. Результати визначення повітропроникності і гігроскопічності тканин з полімерним покриттям представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Вплив полімерних покриттів на гігієнічні властивості тканини

Обробка	Концентрація, г/л	Повітропроникність, дм ³ /м ² ·с	Гігроскопічність, %
Без обробки	0	238	8,33
Lacrytex 640	50	236	6,76
	100	222	6,63
Акратам AS 02.1	50	218	6,97
	100	205	6,70
Tubifast AS 4010	50	229	6,84
	100	201	6,81

З метою аналізу отриманих експериментальних даних розраховано відносну зміну показників гігроскопічності і повітропроникності тканини з полімерним покриттям в залежності від концентрації досліджуваних стирол-акрилових дисперсій, яка представлена на рис. 2 і 3 відповідно.

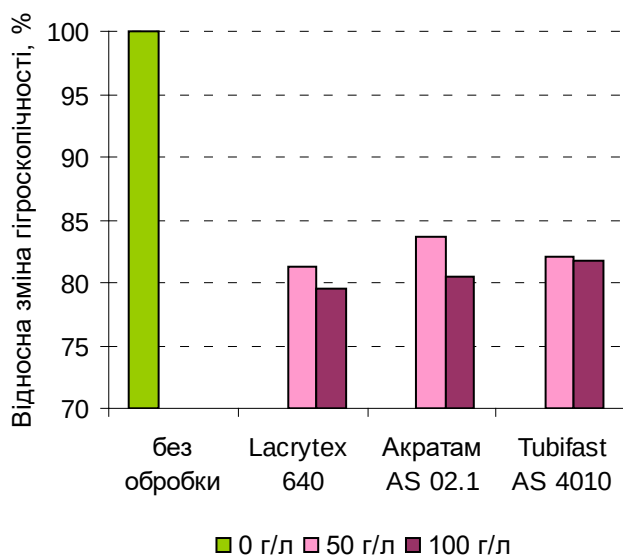


Рис. 2. Відносна зміна гігроскопічності тканини з полімерним покриттям.

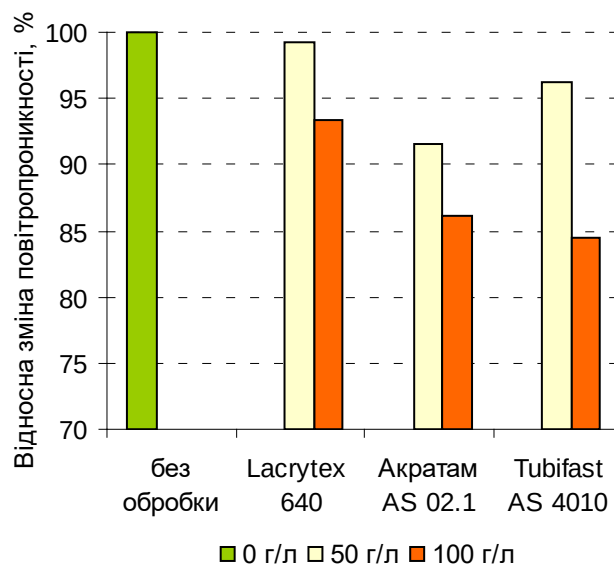


Рис. 3. Відносна зміна повітропроникності тканини з полімерним покриттям.

Аналіз отриманих даних (рис. 2) показує, що при концентрації зазначених полімерних дисперсій 50 г/л гігроскопічність обробленої тканини знижується на 16,3% – 18,8%. Найбільше значення даного показника спостерігається при використанні дисперсії Акратам AS 02.1, а найменше характерне при застосуванні Lacrytex 640. Підвищення вмісту полімерів в просочувальній ванні до 100 г/л знижує гігроскопічність зразків на 18,2% – 20,4%. Слід відзначити, що збільшення концентрації акрилової дисперсії Tubifast AS 4010 призводить до незначної зміни даного показника у досліджуваному діапазоні.

Повітропроникність зразків тканини з акриловим покриттям (рис. 3) зменшується на 0,8% – 8,4% і на 6,7% – 15,5% при концентраціях полімерів 50 г/л і 100 г/л відповідно. Найбільшим показником повітропроникності характеризується зразок з покриттям Lacrytex 640 при обох досліджуваних концентраціях.

Висновки. У роботі проведено дослідження впливу стирол-акрилових покриттів на фізико-механічні і гігієнічні властивості бавовняної тканини. Представлено результати комплексного аналізу впливу сформованого покриття на зміну маси і товщини оброблюваного зразка, а також жорсткості, гігроскопічності та повітропроникності.

Встановлено, що найбільший приріст маси текстильного матеріалу спостерігається при використанні дисперсії Акратам AS 02.1 у всьому досліджуваному діапазоні концентрацій. Найбільша товщина тканини характерна для зразків з покриттями Lacrytex 640 і Tubifast AS 4010 та не залежить від концентрації полімерів.

Визначено, що формування високоеластичного покриття на основі стирол-акрилового сополімеру Tubifast AS 4010 дозволяє забезпечити м'який гриф і високі гігієнічні властивості опорядженої тканини при застосуванні у концентрації до 100 г/л.

Література

1. Chen J., Cheng Q., Chen S. Q. Study on Preparation and Surface Properties of Fluorinated Acrylate Hydrophobic Polymer Film. *Advanced Materials Research*, 2015. Vol. 1088, pp. 101–106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.101
2. Tang W., Huang Y., Meng W., Qing F.-L. Synthesis of fluorinated hyperbranched polymers capable as highly hydrophobic and oleophobic coating materials. *European Polymer Journal*, 2010. 46, 3, pp. 506–518. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2009.12.005
3. Gao Y., Cranston R. Recent Advances in Antimicrobial Treatments of Textiles. *Textile Research Journal*, 2008.78, 1, pp. 60–72. DOI:10.1177/0040517507082332
4. Morais D., Guedes R., Lopes M. Antimicrobial Approaches for Textiles: From Research to Market. *Materials*, 2016. 9, 6, pp. 498–519. DOI:10.3390/ma9060498
5. Carosio F., Di Blasio A., Cuttica F., Alongi J., Malucelli G. Flame Retardancy of Polyester and Polyester-Cotton Blends Treated with Caseins. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014. 53, 10, pp. 3917–3923. DOI: 10.1021/ie404089t
6. Hanumansetty S., Maity J., Foster R., O'Rear E. A. Stain Resistance of Cotton Fabrics before and after Finishing with Admicellar Polymerization. *Applied Sciences*, 2012. 2, pp. 192–205. DOI:10.3390/app2010192
7. Vilčnik A., Jerman I., Šurca Vuk A., Koželj M., Orel B., Tomšič B., Simončič B., Kovač J. Structural Properties and Antibacterial Effects of Hydrophobic and Oleophobic Sol–Gel Coatings for Cotton Fabrics. *Langmuir*, 2009. 25, 10, pp. 5869–5880. DOI:10.1021/la803742c
8. Castelvetro V., Francini G., Ciardelli G., Ceccato M. Evaluating Fluorinated Acrylic Latices as Textile Water and Oil Repellent Finishes. *Textile Research Journal*, 2001. 71, 5, pp. 399–406. DOI:10.1177/004051750107100506
9. Михайлова В.Е. Разработка безопасных аппретирующих составов для комплексной отделки целлюлозосодержащих текстильных материалов / В.Е. Михайлова, В.А. Епишкина, Р.Н. Целмс, В.К. Васильев // Вестник санкт-петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: естественные и технические науки. – 2018. – №2. – С. 59-65.
10. Горшков Д.С. Покрытия на основе стирол-

References

1. Chen, J., Cheng, Q., Chen, S.Q. (2015). Study on Preparation and Surface Properties of Fluorinated Acrylate Hydrophobic Polymer Film. *Advanced Materials Research*, 1088, 101–106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.101.
2. Tang, W., Huang, Y., Meng, W., Qing, F.-L. (2010). Synthesis of fluorinated hyperbranched polymers capable as highly hydrophobic and oleophobic coating materials. *European Polymer Journal*, 46, 3, 506–518. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2009.12.005.
3. Gao, Y., Cranston, R. (2008). Recent Advances in Antimicrobial Treatments of Textiles. *Textile Research Journal*, 78, 1, 60–72. DOI:10.1177/0040517507082332.
4. Morais, D., Guedes, R., Lopes, M. (2016). Antimicrobial Approaches for Textiles: From Research to Market. *Materials*, 9, 6, 498–519. DOI:10.3390/ma9060498.
5. Carosio, F., Di Blasio, A., Cuttica, F., Alongi, J., Malucelli, G. (2014). Flame Retardancy of Polyester and Polyester-Cotton Blends Treated with Caseins. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 10, 3917–3923. DOI: 10.1021/ie404089t.
6. Hanumansetty, S., Maity, J., Foster, R., O'Rear, E.A. (2012). Stain Resistance of Cotton Fabrics before and after Finishing with Admicellar Polymerization. *Applied Sciences*, 2, 192–205. DOI:10.3390/app2010192.
7. Vilčnik, A., Jerman, I., Šurca Vuk, A., Koželj, M., Orel, B., Tomšič, B., Simončič, B., Kovač, J. (2009). Structural Properties and Antibacterial Effects of Hydrophobic and Oleophobic Sol–Gel Coatings for Cotton Fabrics. *Langmuir*, 25, 10, 5869–5880. DOI:10.1021/la803742c.
8. Castelvetro, V., Francini, G., Ciardelli, G., Ceccato, M. (2001). Evaluating Fluorinated Acrylic Latices as Textile Water and Oil Repellent Finishes. *Textile Research Journal*, 71, 5, 399–406. DOI:10.1177/004051750107100506.
9. Mikhaylova, V.E., Epishkina, V.A., Tselms, R.N., Vasil'yev, V.K. (2018). Razrabotka bezopasnykh appretiruyushchikh sostavov dlya kompleksnoy zaklyuchitel'noy otdelki tsellyulozosoderzhashchikh tekstil'nykh materialov [Development of safe compositions for complex final finishing of cellulose-containing textile materials]. *Vestnik SPGUTD. Seriya 1: estestvennye i tekhnicheskie nauki. – Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences*, 2, 59–65 [in Russian].
10. Gorshkov, D.S., Osipchik, V.S. (2005). Pokrytiya na osnove stirol-akrilovykh sopolimerov [Styrene-

акриловых сополимеров / Д.С. Горшков, В.С. Осипчик // Успехи в химии и хим. технол. – 2005. – 19, № 6. – С. 36–40.

11. Слепчук И. Исследование влияния сшивающих агентов на характеристики пространственной сетки и свойства стирол-акриловых полимерных пленок / И. Слепчук, О.Я. Семешко, Т.С. Асаулюк, Ю.Г. Сарибекова // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 2018. – Т. 61, Вып. 7. – С. 68–76. DOI: 10.6060/ivkkt.20186107.5670

acrylic copolymer coatings]. *Uspekhi v khimii i khim. tekhnol.* – *Advances in Chemistry and Chem. Technol.*, 19, 6, 36–40 [in Russian].

11. Slepchuk, I., Semeshko, O.Ya., Asauluk, T.S., Saribekova, Yu.G. (2018). Issledovanie vliyaniya sshivayushchikh agentov na kharakteristiki prostranstvennoy setki i svoystva stiroi-akrilovykh polimernykh plenok [Investigation of impact of crosslinking agents on characteristics of spatial net and properties of styrene-acrylic polymer films]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya.* – *Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 61, 7, 68–76. DOI: 10.6060/ivkkt.20186107.5670 [in Russian].

ASAULYUK TATYANA

Research sector

tatisevna@gmail.com

Scopus Author ID: 56572975800

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5961-6895>

Kherson National Technical University

SARIBYEKOVA YULIA

Research sector

Scopus Author ID: 57189389867

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6430-6509>

Kherson National Technical University

KULISH IRINA

Research sector

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-5904>

Kherson National Technical University

SKALOZUBOVA NATALIA

Research sector

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6048-4068>

Kherson National Technical University

SEMESHKO OLGA

Research sector

Scopus Author ID: 56527168200

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8309-5273>

Kherson National Technical University

MYASNYKOV SERGEY

Research sector

Scopus Author ID: 57194523158

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3147-2436>

Kherson National Technical University

GOROHOV IGOR

Research sector

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9483-4123>

Kherson National Technical University

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТИРОЛ-АКРИЛОВЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГИГИЕНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ТКАНИ

АСАУЛЮК Т.С., СЕМЕШКО О.Я., САРИБЕКОВА Ю.Г., МЯСНИКОВ С.А.,
КУЛИШ И.Н., ГОРОХОВ И.В., СКАЛОЗУБОВА Н.С.

Херсонский национальный технический университет

Цель. Цель работы состоит в исследовании влияния стирол-акриловых полимерных покрытий на изменение физико-механических и гигиенических свойств хлопчатобумажной ткани.

Методика. В качестве объекта исследования выбраны водные дисперсии стирол-акриловых полимеров (Lacrytex 640, Акратам AS 02.1, Tubifast AS 4010). Обработку хлопчатобумажной ткани проведено методом пропитки с варьированием концентрации исследуемых полимеров в отделочной ванне от 50 г/л до 150 г/л с последующей сушкой и термофиксацией. Применены стандартизированные методики исследования свойств текстильных материалов. Влияние полимерных покрытий на физико-механические свойства хлопчатобумажной ткани оценены по показателям прироста массы, толщины и жесткости. Гигиенические свойства обработанной

хлопчатобумажной ткани охарактеризованы по показателям гигроскопичности и воздухопроницаемости.

Результаты. В работе приведены результаты исследования зависимости физико-механических и гигиенических свойств хлопчатобумажной ткани от вида и концентрации примененных стирол-акриловых дисперсий. По результатам эксперимента установлено, что наиболее усиливает упруго-эластические свойства обработанной ткани акриловый сополимер Lacrytex 640 во всем исследуемом диапазоне концентраций. Определено, что наибольшее снижение воздухопроницаемости характерно для образцов ткани с покрытием на основе дисперсии Акратам AS 02.1. Гигроскопичность хлопчатобумажного текстильного материала при повышении концентрации исследуемых стирол-акриловых полимерных дисперсий с 50 г/л до 100 г/л уменьшается незначительно (на 2%).

Научная новизна. Доказано, что стирол-акриловый сополимер Tubifast AS 4010 благодаря образованию высокоэластичной пленки позволяет обеспечить мягкий гриф и высокие гигиенические свойства хлопчатобумажной ткани.

Практическая значимость. Полученные результаты эксперимента имеют практическое значение при разработке новых отделочных составов для текстильных материалов.

Ключевые слова: стирол-акриловая дисперсия, полимерное покрытие, хлопчатобумажная ткань, жесткость, гигроскопичность, воздухопроницаемость.

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF STYRENE-ACRYLIC POLYMERS ON PHYSICAL, MECHANICAL AND HYGIENIC PROPERTIES OF COTTON FABRIC

ASAULYUK T.S., SEMESHKO O.Ya., SARIBYEKOVA Yu.G., MYASNIKOV S.A.,
KULISH I.N., GOROHOV I.V., SKALUZUBOVA N.S.

Kherson National Technical University

Purpose. The purpose of the work is to study the effect of styrene-acrylic polymer coatings on the change in physical, mechanical and hygienic properties of cotton fabric.

Methodology. Aqueous dispersions of styrene-acrylic polymers (Lacrytex 640, Akratam AS 02.1, Tubifast AS 4010) were selected as the object of study. The processing of cotton fabric was carried out by the method of impregnation with varying a concentration of the studied polymers in finishing bath from 50 g/l to 150 g/l, followed by drying and heat setting. Standardized methods for studying the properties of textile materials were applied. The effect of polymer coatings on the physical and mechanical properties of cotton fabric was evaluated by the indicators of weight gain, thickness and rigidity. The hygienic properties of treated cotton fabric were characterized by hygroscopicity and breathability.

Findings. The paper presents the results of a study of the dependence of physical, mechanical and hygienic properties of cotton fabric on the type and concentration of styrene-acrylic dispersions used. According to the results of the experiment, it was found that the acrylic copolymer Lacrytex 640 increases the elastic properties of treated fabric in the entire concentration range studied. It was determined that the greatest decrease in air permeability is typical for fabric samples coated on the basis of Akratam AS 02.1 dispersion. The hygroscopicity of cotton textile material with an increase in a concentration of the studied styrene-acrylic polymer dispersions from 50 g/l to 100 g/l decreases slightly (by 2%).

Originality. It is proved that the styrene-acrylic copolymer Tubifast AS 4010 due to the formation of highly elastic film provides a soft handle and high hygienic properties of cotton fabric.

Practical value. The obtained experimental results are of practical value in the development of new finishing compositions for textile materials.

Keywords: styrene-acrylic dispersion, polymer coating, cotton fabric, rigidity, hygroscopicity, air permeability.

УДК 677.017.84:
677.075.3

СЕМЕШКО О. Я.

Херсонський національний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТРИКОТАЖНИХ ПОЛОТЕН ІЗ НАТУРАЛЬНИХ ВОЛОКОН З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

Мета. Мета роботи полягає у використанні експертного методу оцінювання для встановлення показників якості, за якими можливо було б оцінити зносостійкість трикотажних полотен із натуральних волокон, а саме: бавовняного трикотажу, призначеного для літнього одягу, та вовняного трикотажу, призначеного для весняно-осіннього асортименту виробів.

Методика. Запропоновано визначати вплив різноманітних факторів на зносостійкість трикотажних полотен із натуральних волокон за основними одиничними показниками їх якості із переліку та на основі норм ДСТУ 3823-98 «Полотна трикотажні. Норми та метод оцінки якості». Експертна комісія була сформована із числа спеціалістів – кандидатів та докторів наук у галузі технології текстильних матеріалів, швейних та трикотажних виробів. Ранжування проводилося десятьма експертами для 12 об'єктів експертизи – одиничних показників якості бавовняного трикотажу, та для 13 об'єктів експертизи – одиничних показників якості вовняного трикотажу.

Результати. Результати ранжування показали, що для більшості експертів головними показниками якості бавовняного трикотажу є зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, розривальне навантаження та ступінь тривкості пофарбування до дії світла, а для вовняного трикотажу – зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, число циклів стирання та ступінь тривкості пофарбування до дії світла. З метою оцінки загальної узгодженості думок експертів та визначення достовірності одержаних експертних оцінок розраховані коефіцієнти конкордації, значення яких свідчать про високий ступінь узгодженості думок експертів і дозволяє оцінити узгодження рішень експертів на «задовільно». Визначення коефіцієнтів вагомості показників якості дозволили встановити їх значимість для бавовняного та вовняного трикотажу.

Наукова новизна. У результаті проведених досліджень встановлено вагомість та значимість одиничних показників якості бавовняних та вовняних трикотажних полотен в процесі їх експлуатації.

Практична значимість. Встановлені показники якості бавовняних та вовняних трикотажних полотен для визначення їх зносостійкості.

Ключові слова: бавовняний трикотаж, вовняний трикотаж, показники якості, зносостійкість, метод експертних оцінок, ранжування.

Вступ. Відомо, що зносостійкість трикотажних полотен є комплексним показником таких характеристик, як міцність, світло-, формо- термо-, хемостійкість та стійкість до біологічного впливу, які визначаються шляхом встановлення відповідних показників якості [1-3].

Постановка проблеми. Оцінювання якості трикотажних виробів, як і інших виробів легкої промисловості, – це складний багатоступеневий процес. В умовах ринкової економіки стандартизація стала одним з основних важелів удосконалення не тільки структури асортименту, оптимізації рівня споживних властивостей та якості різних за призначенням груп трикотажних виробів, але й проектування та випуску виробів із заданим рівнем конкурентоспроможності. Для волокнистих матеріалів групи споживних властивостей (механічні, гігієнічні, естетичні та технологічні) визначаються одиничними показниками

якості та оцінюються шляхом їх кількісного визначення. Значимість одиничних показників якості для волокнистих матеріалів різного призначення і волокнистого складу може змінюватись. Відомо, що навіть в межах однієї групи пальтових вовняних тканин значимість одиничних показників якості є неоднаковою для різних статево-вікових груп. Так встановлено, що для жінок у віці 18-27 років найбільш важливими є естетичні властивості пальтових тканин (біля 50%), а потім уже гігієнічні та зносостійкі (по 25%). В той час як для жінок старшого віку (більше 45 років) важливішими є зносостійкість (40%) і гігієнічні властивості (30%) [4, 5].

У текстильній і легкій промисловості оцінка якості продукції може проводитись за вагомими одиничними показниками якості, при цьому їх вагомість найчастіше визначається методом експертних оцінок на основі використання досвіду висококваліфікованих спеціалістів [6].

Таким чином, метою дослідження є використання експертного методу оцінювання для встановлення показників якості, за якими можливо було б оцінити зносостійкість трикотажних полотен із натуральних волокон.

Результати дослідження. Метод експертних оцінок згідно із загальним алгоритмом складається із наступних етапів: підготовчого, етапу одержання експертних оцінок та етапу математично-статистичної обробки отриманих даних [7, 8].

На I етапі досліджень необхідно сформулювати експертну комісію та визначити номенклатуру одиничних показників якості трикотажних полотен із натуральних волокон.

Аналіз особливостей використання експертного методу показав, що рівень кваліфікації та кількість експертів мають вагомий вплив на точність і надійність отриманих результатів [6-8]. Підбір експертів повинен бути здійснений серед висококваліфікованих фахівців даної галузі. Для визначення вагомості показників якості трикотажних полотен із натуральних волокон були відібрані експерти серед співробітників ХНТУ – кандидатів та докторів наук за спеціальністю 05.18.19 – технологія текстильних матеріалів, швейних та трикотажних виробів.

В Україні з метою сертифікації та оцінки якості трикотажних полотен одягового призначення (для верху одягу і підкладки) перелік та норми їх гігієнічних, фізико-механічних і фізико-хімічних показників у вигляді одиничних показників якості регламентовані ДСТУ 3823-98 «Полотна трикотажні. Норми та метод оцінки якості» [9].

У табл. 1 наведений перелік одиничних показників якості, норми для бавовняного та вовняного трикотажних полотен, призначених для виготовлення верхнього одягу для усіх статево-вікових груп та зазначено нормативні документи, за якими визначаються вказані показники якості.

Таблиця 1

**Показники якості трикотажних полотен із натуральних волокон за ДСТУ 3823-98
«Полотна трикотажні. Норми та метод оцінки якості»**

№ з/п	Найменування показника, одиниця вимірювання	Бавовняний трикотаж	Вовняний трикотаж	Нормативний документ
1	Вид і масова частка сировини, %	нормуються у технічному описі на полотно		ДСТУ 4057-2001
2	Поверхнева густина, г/м			ГОСТ 8845-87
3	Розтяжність по ширині (за петельними рядками) при навантаженні 6 Н, %	І група – 0-40 ІІ група – 41-100		ГОСТ 8847-85

Продовження таблиці 1

4	Розривальне навантаження, Н	не менше 80		ГОСТ 8847-85
5	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок або хімічного чищення, %: по довжині по ширині	не більше 8 10		ДСТУ ГОСТ 30157.0 ДСТУ ГОСТ 30157.1
6	Стійкість до стирання, число циклів	міцне – 31-60		ГОСТ 12739
7	Повітропроникність, дм ³ /м ² ·с	не менше 100		ГОСТ 12088-77
8	Гігроскопічність, %	не менше 14		ДСТУ ГОСТ 3816-2009
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:				
9	світла	5	6	ГОСТ 9733.1-91
10	прання №1	4/5	4/5	ГОСТ 9733.4-83
11	дистильованої води	4/5	5/4	ГОСТ 9733.5-83
12	«поту» за методом 2	4/5	4/4	ГОСТ 9733.6-83
13	сухого прасування	5	–	ГОСТ 9733.7-83
14	прасування з запарюванням	–	5	ГОСТ 9733.7-83
15	органічних розчинників	–	5	ГОСТ 9733.13-83
16	сухого тертя	4	4	ГОСТ 9733.27-83

Отже, досліджуваними показниками якості трикотажних полотен із натуральних волокон при визначенні їх зносостійкості обрано показники якості за ДСТУ 3823-98 «Полотна трикотажні. Норми та метод оцінки якості», наведені у табл. 1, на основі чого було складено анкети для опитування з метою визначення їх вагомості та значимості.

Під час опитування на II етапі реалізації експертного методу фахівці виконували рангову оцінку одиничних показників якості бавовняного та вовняного трикотажу наступним чином: вагомість кожного показника якості експерти оцінювали за п'ятибальною системою з умовою, що однакову оцінку можна виставити не більше як трьом показникам.

Далі отримані результати були оброблені за допомогою методу ранжування шляхом складання матриці та розрахунку вагомості одиничних показників із застосуванням математично-статистичної обробки даних [8, 10].

Ранжування інформаційних даних проводилося десятима експертами для 12 об'єктів експертизи – одиничних показників якості бавовняного трикотажу, та для 13 об'єктів експертизи – одиничних показників якості вовняного трикотажу. Результати експертної оцінки, а саме ранжування досліджуваних об'єктів – одиничних показників якості бавовняного трикотажу, представлено у вигляді матриці в табл. 2, а ранжування одиничних показників якості вовняного трикотажу – в табл. 3 з обчисленням суми їх рангових оцінок R_i , загальної суми рангів $\sum R_i$ та середньої суми рангів $\sum T_j$ за формулами (1)-(3):

$$\sum R_i = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (1)$$

$$\sum T_j = \sum_{j=1}^n T_j, \quad (2)$$

$$T_j = \frac{\sum_{j=1}^n (t_j^3 - t_j)}{12}, \quad (3)$$

де m – кількість одиничних показників якості;
 u – число з однаковими оцінками j -ого експерта;
 t_j – число однакових оцінок в межах j -ого експерта.

Таблиця 2

Матриця ранжування показників якості бавовняного трикотажу

№ з/п	Показник якості	Рангові оцінки експертів										Сума рангових оцінок, R_i
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Розтяжність по ширині, %	4	4	2	1	3	3	4	3	3	4	31
2	Розривальне навантаження, Н	4	5	5	5	4	4	3	5	4	5	44
3	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %	5	4	3	5	5	5	3	5	5	5	45
4	Число циклів стирання	3	5	3	4	2	2	3	2	3	1	28
5	Повітропроникність, $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{с}$	5	2	2	1	3	1	4	3	1	1	23
6	Гігроскопічність, %	4	4	1	4	5	3	5	1	1	3	31
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:												
7	світла	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	48
8	дистильованої води	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	15
9	прання	3	3	3	3	4	2	2	5	2	4	31
10	«поту»	2	2	4	5	1	3	5	3	2	4	31
11	сухого тертя	1	3	2	3	2	4	2	4	4	3	28
12	сухого прасування	1	3	1	2	3	2	1	2	4	3	22
Загальна сума рангів $\sum R_i$												377
Середня сума рангів $\sum T_j$												59

Таблиця 3

Матриця ранжування показників якості вовняного трикотажу

№ з/п	Показник якості	Рангові оцінки експертів										Сума рангових оцінок, R_i
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Розтяжність по ширині, %	3	2	4	5	2	1	3	2	3	4	29
2	Розривальне навантаження, Н	5	1	1	3	2	4	4	1	5	3	29
3	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %	4	4	5	4	4	5	5	5	4	5	45
4	Число циклів стирання	3	5	5	3	5	3	5	4	5	5	43
5	Повітропроникність, $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{с}$	5	2	2	1	2	1	4	1	1	1	20
6	Гігроскопічність, %	5	4	1	2	3	2	4	2	4	1	28
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:												
7	світла	4	5	4	4	5	4	3	3	3	4	39
8	дистильованої води	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2	16
9	прання	4	4	3	3	1	2	2	3	3	3	28
10	«поту»	3	2	3	4	4	4	1	3	2	1	27
11	сухого тертя	1	3	2	5	4	3	1	4	4	2	29
12	прасування з запарюванням	2	3	2	2	3	3	3	4	5	2	29
13	органічних розчинників	1	5	5	1	3	1	2	5	1	5	29
Загальна сума рангів $\sum R_i$												391
Середня сума рангів $\sum T_j$												71

Аналіз даних табл. 2 і 3 свідчить, що для більшості експертів головними показниками якості бавовняного трикотажу є ступінь тривкості пофарбування до дії світла, зміна лінійних розмірів після мокрих обробок та розривальне навантаження, а для вовняного трикотажу – зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, число циклів стирання та ступінь тривкості пофарбування до дії світла. Усі інші якісні характеристики трикотажних полотен із натуральних волокон виявилися менш важливими та отримали низькі рангові оцінки.

На III етапі експертного оцінювання трикотажних полотен із натуральних волокон для визначення достовірності одержаних експертних оцінок з метою визначення загальної

узгодженості думок експертів необхідно розрахувати коефіцієнти конкордації W за формулою:

$$W = \frac{\sum S}{S_{\max} - m \cdot \sum T_j}, \quad (4)$$

де $\sum S$ – сума квадратів відхилень суми рангів кожного об'єкта експертизи від середньої суми рангів;

$S_{\max}$ – максимальна сума квадратів відхилень.

$$\sum S = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (5)$$

$$S_i = (R_i - \sum T_j)^2, \quad (6)$$

$$S_{\max} = \frac{n^2(m^3 - m)}{12}. \quad (7)$$

Результати математично-статистичної обробки даних узагальнено та наведено в табл. 4 і табл. 5 для показників якості бавовняного та вовняного трикотажних полотен відповідно.

Таблиця 4

Математично-статистична обробка результатів ранжування одиничних показників якості бавовняного трикотажу

№ з/п	Показник якості	Математично-статистична обробка даних	
		Сума рангових оцінок, R_i	Квадрат відхилення суми рангів кожного показника від середньої суми рангів, S_i
1	Розтяжність по ширині, %	31	784
2	Розривальне навантаження, Н	44	225
3	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %	45	196
4	Число циклів стирання	28	961
5	Повітропроникність, $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{с}$	23	1296
6	Гігроскопічність, %	31	784
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:			
7	світла	39	121
8	дистильованої води	16	1936
9	прання	28	784
10	«поту»	27	784
11	сухого тертя	29	961
12	сухого прасування	29	1369
Середня сума рангів $\sum T_j$		71	–
Сума квадратів відхилень суми рангів кожного об'єкта експертизи від середньої суми рангів, $\sum S$		–	10201
Максимальна сума квадратів відхилень, $\sum S_{\max}$		–	14300
Коефіцієнт конкордації, W		0,744	

Якщо коефіцієнт конкордації W дорівнює нулю або близький до нього, то це означає повну неузгодженість думок експертів, а якщо його значення наближається до одиниці – це свідчить про єдність думок експертів. Подальша робота з експертними оцінками доцільна лише за умови $W > 0,4$ [8, 10]. У нашому випадку коефіцієнт конкордації показників якості бавовняного трикотажного полотна становить $W = 0,744$, а вовняного – $W = 1,290$, що свідчить про високий ступінь узгодженості думок експертів і дозволяє оцінити узгодження рішень експертів на «задовільно».

Таблиця 5

**Математично-статистична обробка результатів ранжування одиничних показників
якості вовняного трикотажу**

№ з/п	Показник якості	Математично-статистична обробка даних	
		Сума рангових оцінок, R_i	Квадрат відхилення суми рангів кожного показника від середньої суми рангів, S_i
1	Розтяжність по ширині, %	29	1764
2	Розривальне навантаження, Н	29	1764
3	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %	45	676
4	Число циклів стирання	43	784
5	Повітропроникність, дм ³ /м ² с	20	2601
6	Гігроскопічність, %	28	1849
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:			
7	світла	39	1024
8	дистильованої води	16	3025
9	прання	28	1849
10	«поту»	27	1936
11	сухого тертя	29	1764
12	прасування з запарюванням	29	1764
13	органічних розчинників	29	1764
Середня сума рангів $\sum T_j$		59	–
Сума квадратів відхилень суми рангів кожного об'єкта експертизи від середньої суми рангів, $\sum S$		–	22564
Максимальна сума квадратів відхилень, $\sum S_{max}$		–	18200
Коефіцієнт конкордації, W		1,290	

Для оцінки значущості коефіцієнтів конкордації W необхідно порівняти розрахункові $\chi^2_{розр}$ та табличні $\chi^2_{табл}$ значення критерію узгодження Пірсона [11]:

$$\chi^2_{розр} = W \cdot n(m - 1). \quad (8)$$

За формула 8 було обчислено розрахункові критерії узгодження Пірсона:

- для бавовняного трикотажного полотна: $\chi^2_{розр} = 0,744 \cdot 10 \cdot (12 - 1) = 81,85$;

- для вовняного трикотажного полотна: $\chi^2_{розр} = 1,290 \cdot 10 \cdot (13 - 1) = 154,81$.

Табличні значення критеріїв узгодження Пірсона $\chi^2_{табл}$ знаходять за таблицями [11] для числа ступенів свободи $K=m-1$ і при заданому рівні значущості $\alpha=0,05$. Якщо $\chi^2_{розр} \leq \chi^2_{табл}$, то коефіцієнт конкордації W є значущим зі встановленою ймовірністю [8, 10].

Табличні значення критеріїв узгодження Пірсона:

- для бавовняного трикотажного полотна для числа ступенів свободи $K=11$ при рівні значущості $\alpha = 0,05$ дорівнює $\chi^2_{табл} = 19,7$;

- для вовняного трикотажного полотна для числа ступенів свободи $K=12$ при рівні значущості $\alpha=0,05$ дорівнює $\chi^2_{табл} = 21$.

Оскільки розрахункові значення критеріїв узгодження Пірсона $\chi^2_{розр}$ перевищують табличні як для бавовняного трикотажного полотна ($81,85 > 19,7$), так і для вовняного трикотажного полотна ($154,8 > 21$), то, відповідно, отримані коефіцієнти конкордації для бавовняного і вовняного трикотажного полотна є величинами не випадковими. Тому,

отримані результати є достовірними і можуть використовуватися під час подальших досліджень.

На основі одержаних експертних оцінок, високу достовірність та надійність яких було доведено їх математично-статистичною обробкою, визначено коефіцієнти вагомості кожного показника якості q_i за формулою:

$$q_i = \frac{R_i}{\sum R_i}, \quad (9)$$

Це дозволить виділити з усього переліку показників якості найбільш вагомі характеристики якості бавовняного та вовняного трикотажу, для яких виконується умова $q_i \geq 1/m$, а коефіцієнти вагомості значимих показників q_{i0} дозволяють оцінити їх значимість. Оскільки $\sum q_1 = 1$ то коефіцієнти вагомості значимих показників обчислюють за формулою:

$$q_{i0} = \frac{q_i^*}{\sum_{i=1}^m q_i^*}, \quad (10)$$

де q_i^* – коефіцієнти вагомості показників, для яких виконується умова $q_i \geq 1/m$.

Результати математичних розрахунків коефіцієнтів вагомості кожного одиничного показника якості бавовняних та вовняних трикотажних полотен q_i та коефіцієнтів вагомості значущих показників q_{i0} представлені у вигляді табл. 6 і 7 та діаграм на рис. 1 і 2 відповідно.

Таблиця 6

Коефіцієнти вагомості показників якості бавовняного трикотажу

№ з/п	Показник якості	Коефіцієнт вагомості, q_i	Значущий коефіцієнт вагомості, q_{i0} за умови $q_i \geq 0,083$
1	2	3	4
1	Розтяжність по ширині, %	0,082	$q_i \leq 0,083$
2	Розривальне навантаження, Н	0,117	0,322
3	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %	0,119	0,328
4	Число циклів стирання	0,074	$q_i \leq 0,083$
5	Повітропроникність, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	0,061	$q_i \leq 0,083$
6	Гігроскопічність, %	0,082	$q_i \leq 0,083$
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:			
7	світла	0,127	0,350
8	дистильованої води	0,040	$q_i \leq 0,083$
9	прання	0,082	$q_i \leq 0,083$
10	«поту»	0,082	$q_i \leq 0,083$
11	сухого тертя	0,074	$q_i \leq 0,083$
12	сухого прасування	0,058	$q_i \leq 0,083$
Разом		1	–

Аналіз результатів розрахунків, які були виконані за методом експертних оцінок, дозволяє зробити висновок, що найбільш значимими для експертів з наведених у ДСТУ 3823-98 «Полотна трикотажні. Норми та метод оцінки якості» одиничних показників якості для бавовняного трикотажу є ті, що мають значущі коефіцієнти вагомості $q_1=0,350$, $q_2=0,328$, $q_3=0,322$, тобто ступінь тривкості пофарбування до дії світла, зміна лінійних розмірів після мокрих обробок та розривальне навантаження відповідно.

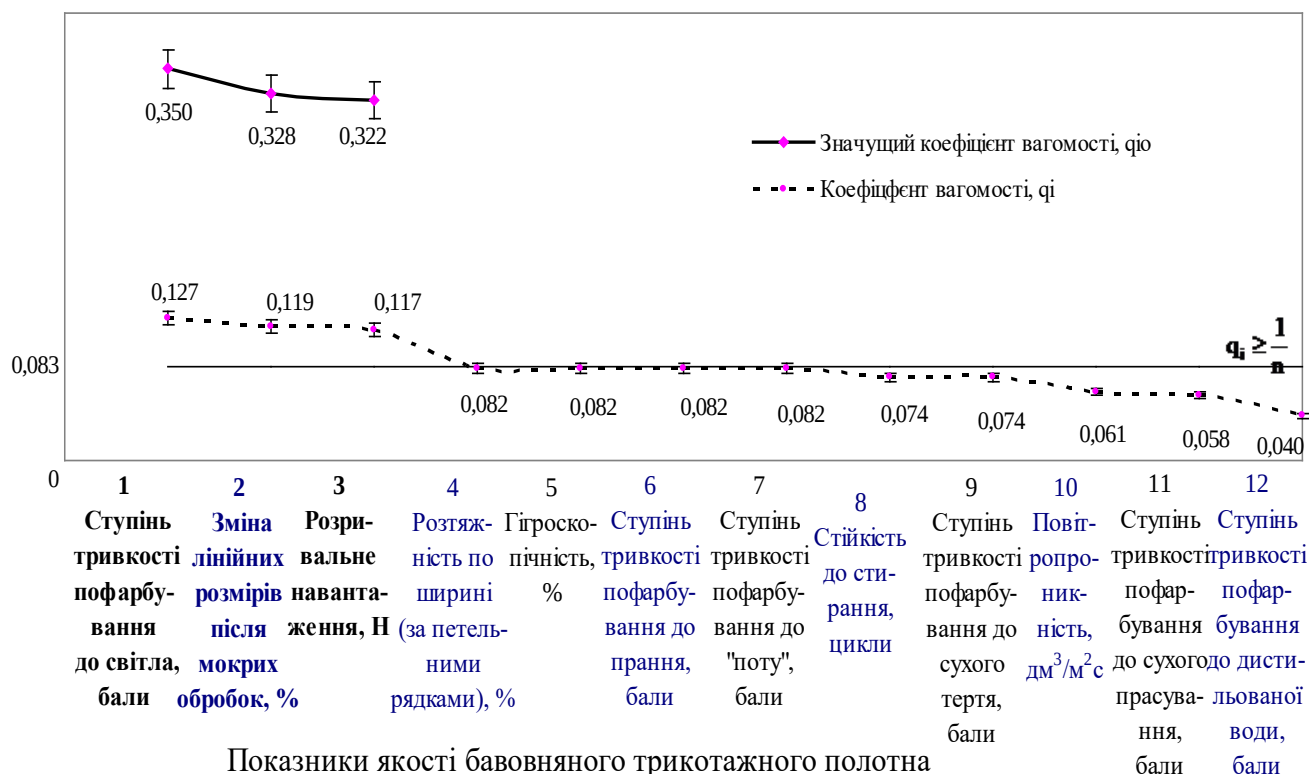


Рис. 1. Шкала порядку для визначення значущості коефіцієнтів вагомості показників якості бавовняного трикотажу

Таблиця 7

Коефіцієнти вагомості показників якості вовняного трикотажу

№ з/п	Показник якості	Коефіцієнт вагомості, q_i	Значущий коефіцієнт вагомості, q_{i0} за умови $q_i \geq 0,077$
1	2	3	4
1	Розтяжність по ширині, %	0,074	$q_i \geq 0,077$
2	Розривальне навантаження, Н	0,074	$q_i \geq 0,077$
3	Зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %	0,115	0,354
4	Число циклів стирання	0,110	0,339
5	Повітропроникність, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	0,051	$q_i \geq 0,077$
6	Гігроскопічність, %	0,072	$q_i \geq 0,077$
Ступінь тривкості пофарбування до дії, бали:			
7	світла	0,100	0,307
8	дистильованої води	0,041	$q_i \geq 0,077$
9	прання	0,072	$q_i \geq 0,077$
10	«поту»	0,069	$q_i \geq 0,077$
11	сухого тертя	0,074	$q_i \geq 0,077$
12	прасування з запарюванням	0,074	$q_i \geq 0,077$
13	органічних розчинників	0,074	$q_i \geq 0,077$
Разом		1	—

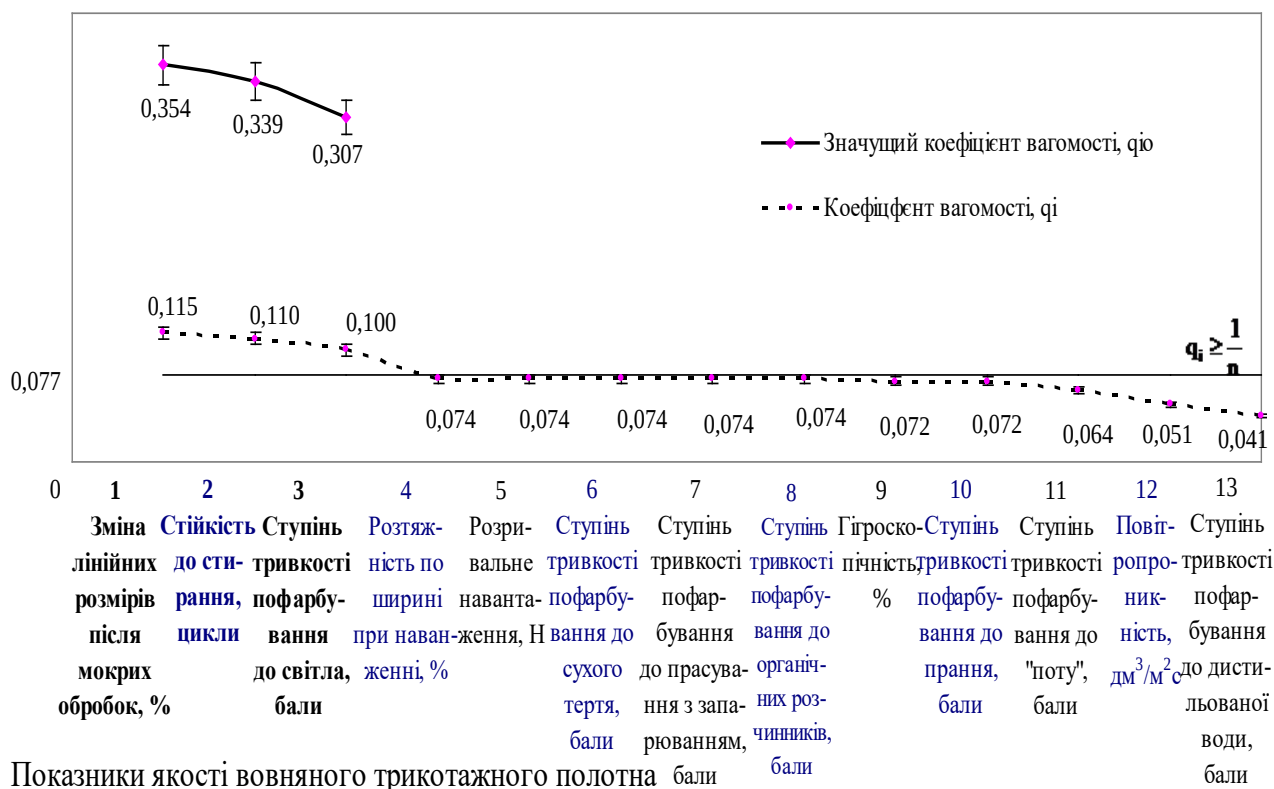


Рис. 2. Шкала порядку для визначення значущості коефіцієнтів вагомості показників якості вовняного трикотажу

Результати розрахунків, які були виконані за методом експертних оцінок, дозволяють стверджувати, що найбільш значимими для експертів з наведених у ДСТУ 3823-98 «Полотна трикотажні. Норми та метод оцінки якості» показників для вовняного трикотажу є ті, що мають значущі коефіцієнти вагомості $q_1=0,354$, $q_2=0,339$, $q_3=0,307$, тобто зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, число циклів стирання та ступінь тривкості пофарбування до дії світла.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено, що загальний рівень якості бавовняного та вовняного трикотажних полотен у процесі зношування може бути визначений за найвагомішими одиничними показниками якості. Шляхом реалізації методу експертної оцінки встановлено, що для бавовняних трикотажних полотен під час експлуатації бавовняного трикотажного літнього одягу вагомими показниками якості є ступінь тривкості пофарбування до дії світла, зміна лінійних розмірів після мокрих обробок та розривальне навантаження, а для вовняних трикотажних полотен при експлуатації вовняного трикотажного одягу весняно-осіннього асортименту – зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, стійкість до стирання та ступінь тривкості пофарбування до дії світла.

За визначеними вагомими одиничними показниками якості бавовняного та вовняного трикотажу можна охарактеризувати зносостійкість вказаних матеріалів за оцінкою їх світло-, формостійкості та міцності шляхом визначення ступеня тривкості пофарбувань до дії світла, зміни лінійних розмірів після мокрих обробок та розривального навантаження або стійкості до стирання. Але при цьому слід зазначити, що значимість одиничних показників якості для

бавовняного та вовняного трикотажу відрізняється. Забезпечення зазначених характеристик зносостійкості трикотажних полотен із натуральних волокон у хімічній технології волокнистих матеріалів відбувається шляхом надання матеріалам стійкості до відповідних впливів.

Таким чином, на підставі одержаних результатів експертної оцінки можна зробити висновок, що трикотажним полотнам із натуральних волокон у ході опорядження необхідно забезпечити стійкі в умовах експлуатації виробів характеристики зносостійкості, а саме: світло-, формостійкість, а також міцність.

Література

1. Пугачевський Г.Ф. Товарознавство непродовольчих товарів. Частина 1. Текстильне товарознавство / Г.Ф. Пугачевський, Б.Д. Семак. – К.: НМЦ «Укоопосвіта», 1999. – 596.
2. Галик І.С. Товарознавство непродовольчих товарів: Підруч. для студ. вищ. закл. освіти. Ч. 2. Товарознавство трикотажних товарів / І.С. Галик, Б.Д. Семак. – К.: НМЦ «Укоопосвіта», 2001. – 292 с.
3. Зіміна Н.К. Товарознавство трикотажних товарів / Н.К. Зіміна, Н.О. Дзюбак, Л.В. Черняк. – К.: КНТЕУ, 2002. – 159 с.
4. Дзахмишева И.Ш. Товароведение и экспертиза швейных, трикотажных и текстильных товаров / И.Ш. Дзахмишева, С.И. Балаева, М.В. Блиева, Р.М. Алагирова: [под ред. Дзахмишевой И.Ш.] – М.: «Дашков и Ко», 2009. – 346с.
5. Дианич М.М. Ассортимент трикотажных изделий из смеси волокон / М.М. Дианич, Б.Д. Семак. – К.: Техника, 1983. – 144 с.
6. Лунькова С.В. Измерение качества (квалиметрия) текстильных материалов и товаров / С.В. Лунькова, А.Ю. Матрохин. – Иваново: ИГТА, 2004. – 41 с.
7. Параметри вагомості показників якості. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://stud.com.ua/16672/investuvannya/parametri_vagomosti_pokaznikov_yakosti.
8. Бешелев С.Р. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Р. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М.: Статистика, 1980. – 262 с.
9. ДСТУ 3823-98 Полотна трикотажні. Норми та методи оцінки якості. – Київ: Держстандарт України, 1999. – 51 с.

References

1. Puhachevs'kyu, H.F., Semak, B.D. (1999). *Tovaroznnavstvo neprodovol'chyykh tovariv. Chastyna 1. Tekstyl'ne tovaroznavstvo* [Commodity science of non-food products. Part 1. Textile commodity science]. Kyiv, Ukooposvita [in Ukrainian].
2. Halyk, I.S., Semak, B.D. (2001). *Tovaroznnavstvo neprodovol'chyykh tovariv: Pidruch. dlya stud. vyssh. zakl. osvity. Chastyna 2. Tovaroznavstvo trykotazhnykh tovariv* [Commodity science of non-food products: Textbook. for students. higher lock education. Part 2. Commodity of knitted goods]. Kyiv, Ukooposvita [in Ukrainian].
3. Zimina, N.K., Dzyubak, N.O., Chernyak, L.V. (2002). *Tovaroznnavstvo trykotazhnykh tovariv* [Commodity science of knitted goods]. Kyiv, KNTEU [in Ukrainian].
4. Dzakhmysheva, Y.SH., Balaeva, S.Y., Blyeva, M.V., Alahyrova, R.M. (2009). *Tovarovedenye y ékspertyza shveynykh, trykotazhnykh y tekstyl'nykh tovarov* [Commodity science and examination of garments, knitwear and textiles]. Moscow, «Dashkov y Ko». [in Russian].
5. Dyanych, M.M., Semak, B.D. (1983). *Assortyment trykotazhnykh yzdelyy yz smesy volokon* [Assortment of knitwear from a mixture of fibers]. Kyiv, Tekhnyka. [in Russian].
6. Lun'kova, S.V., Matrokhyn, A.Yu. (2004). *Yzmerenye kachestva (kvalymetrya) tekstyl'nykh materyalov y tovarov* [Measurement of quality (qualimetry) of textile materials and goods]. Yvanovo: YHTA. [in Russian].
7. *Parametry vahomosti pokaznykiv yakosti*. [Parameters of weight of quality indicators]. Retrieved from https://stud.com.ua/16672/investuvannya/parametri_vagomosti_pokaznikov_yakosti [in Ukrainian].
8. Beshelev, S.R., Hurvych, F.H. (1980). *Matematyko-statysticheskiye metody ékspertnykh otsenok* [Mathematical and statistical methods of expert assessments]. Moscow, Statystyka. [in Russian].
9. DSTU 3823-98. (1999). *Polotna trykotazhni. Normy ta metody otsinky yakosti* [Knitted fabrics. Standards and methods of quality assessment]. Kyiv, Derzhstandart Ukrayiny. [in Ukrainian].
10. Rumshynskyy, L.Z. (1971). *Matematycheskaya*

10. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
11. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 320 с.
11. Akhnazarova, S.L., Kafarov, V.V. (1978). Optymyzatsyya éksperymenta v khymyy u khymycheskoy tekhnolohyy [Experimental optimization in chemistry and chemical technology]. Moscow, Vysshaya shkola. [in Russian].

SEMESHKO OLGA

Research sector

solgaya@gmail.com

Scopus Author ID: 56527168200

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8309-5273>

Kherson National Technical University

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН ИЗ НАТУРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СЕМЕШКО О.Я.

Херсонский национальный технический университет

Цель. Цель работы заключается в использовании экспертного метода оценки для установления показателей качества, по которым можно было бы оценить износостойкость трикотажных полотен из натуральных волокон, а именно: хлопчатобумажного трикотажа, предназначенного для летней одежды, и шерстяного трикотажа, предназначенного для весенне-осеннего ассортимента изделий.

Методика. Предложено определять влияние различных факторов на износостойкость трикотажных полотен из натуральных волокон по основным единичным показателям их качества из перечня и на основе норм ДСТУ 3823-98 «Полотна. Нормы и метод оценки качества». Экспертная комиссия была сформирована из числа специалистов – кандидатов и докторов наук в области технологии текстильных материалов, швейных и трикотажных изделий. Ранжирование проводилось десятью экспертами для 12 объектов экспертизы – единичных показателей качества хлопчатобумажного трикотажа, и для 13 объектов экспертизы – единичных показателей качества шерстяного трикотажа.

Результаты. Результаты ранжирования показали, что для большинства экспертов главными показателями качества хлопчатобумажного трикотажа являются изменение линейных размеров после мокрых обработок, разрывная нагрузка и устойчивость окраски к действию света, а для шерстяного трикотажа – изменение линейных размеров после мокрых обработок, число циклов истирания и устойчивость окраски к действию света. С целью оценки общей согласованности мнений экспертов и определения достоверности полученных экспертных оценок рассчитаны коэффициенты конкордации, значения которых свидетельствуют о высокой степени согласованности мнений экспертов и позволяют оценить согласования решений экспертов на «удовлетворительно». Определение коэффициентов весомости показателей качества позволили установить их значимость для хлопкового и шерстяного трикотажа.

Научная новизна. В результате проведенных исследований установлены весомость и значимость единичных показателей качества хлопчатобумажных и шерстяных трикотажных полотен в процессе их эксплуатации.

Практическая значимость. Установленные показатели качества хлопчатобумажных и шерстяных трикотажных полотен для определения их износостойкости.

Ключевые слова: хлопчатобумажный трикотаж, шерстяной трикотаж, показатели качества, износостойкость, метод экспертных оценок, ранжирование.

APPLICATION OF THE METHOD OF EXPERT ASSESSMENTS TO ESTABLISH THE MAIN QUALITY INDICATORS OF NATURAL FIBER KNITTED FABRICS IN ORDER TO DETERMINE THEIR WEAR RESISTANCE

SEMESHKO O.Ya.

Kherson National Technical University

Purpose. The goal of the work is to use an expert assessment method to establish quality indicators by which it would be possible to assess the wear resistance of natural fiber knitted fabrics, namely: cotton knitwear intended for summer clothes, and wool knitwear intended for the spring-autumn assortment of products.

Methodology. It is proposed to determine the influence of various factors on the wear resistance of natural fiber knitted fabrics according to the main single quality indicators from the list and based on the standards DSTU 3823-98 "Fabrics. Standards and method of quality assessment". The expert commission was formed from among experts – PhDs and Doctors of Science in the field of technology of textile materials, sewing and knitted products. The ranking was carried out by ten experts for 12 objects of expertise – individual quality indicators of cotton knitwear, and for 13 objects of expertise – individual quality indicators of wool knitwear.

Findings. The ranking results showed that for most experts, the main quality indicators of cotton knitwear are the change in linear dimensions after wet treatments, breaking load and colour fastness to light, and for wool knitwear – the change in linear size after wet treatments, the number of abrasion cycles and colour fastness to light. In order to assess the overall consistency of expert opinions and determine the reliability of the obtained expert estimates, concordance coefficients are calculated, the values of which indicate a high degree of consistency of expert opinions and allow us to evaluate the agreement of expert decisions as "satisfactory". The determination of the weight coefficients of quality indicators made it possible to establish their significance for cotton and wool knitwear.

Originality. As a result of the studies, the value and significance of individual quality indicators of cotton and wool knitted fabrics in the operation process are established.

Practical value. The quality indicators of cotton and wool knitted fabrics to determine their wear resistance are established.

Keywords: cotton knitted fabrics, wool knitted fabrics, quality indicators, wear resistance, method of expert assessments, ranking.

УДК 677.017

ЗДОРЕНКО В. Г., БАРИЛКО С. В., ЛІСОВЕЦЬ С. М.,
ШИПКО Д. О.

Київський національний університет технологій та дизайну

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ПРИ
ЇХ ПРОХОДЖЕННІ ТА ВІДБИТТІ ВІД ОДНОШАРОВИХ
МАТЕРІАЛІВ З ПОРАМИ РІЗНОГО РОЗМІРУ**

Мета. Дослідити як змінюється згасання ультразвукових хвиль у різних одношарових матеріалах з наявними порами різного розміру. Зазначене необхідне для можливості створення безконтактних засобів ультразвукового контролю таких матеріалів.

Методика. У роботі для аналізу процесу взаємодії ультразвукових хвиль з одношаровими матеріалами з різними порами та для аналізу зміни амплітудного згасання зондуючих коливань використовувався метод визначення відносної зміни цього параметру з врахуванням товщини або поверхневої густини матеріалу.

Результати. Наведено вирази для модулів комплексного коефіцієнту проходження та відбиття ультразвукових хвиль від одношарових матеріалів з малими порами, а також від текстильних одношарових матеріалів із наскрізними порами, крізь які проходить більша частина коливань. Приведені залежності відносних змін амплітудних згасань хвиль від частоти коливань, товщини та поверхневої густини матеріалу. Показано, що згасання амплітуди ультразвукових хвиль, які взаємодіють з одношаровими матеріалами з малими порами, та згасання коливань для одношарових текстильних полотен можуть сильно відрізнятися одне від одного. Ця різниця спричинена огинанням частини звукових хвиль самих волокон текстильних полотен з наскрізними порами при взаємодії з ними зондуючих коливань.

Наукова новизна. Отримано залежності відносних змін різниці модулів з врахуванням згасання та без нього для комплексних коефіцієнтів відбиття та проходження ультразвукових хвиль. Зазначені коливання, що взаємодіють з одношаровими матеріалами з різними порами, розглядаються з врахуванням частоти ультразвукових хвиль, розмірів пор, товщини або поверхневої густини самого матеріалу.

Практична значимість. Отримані залежності для визначення згасання амплітуди зондуючих ультразвукових хвиль від структури, пористості матеріалу, його товщини або поверхневої густини. Це дасть можливість створювати безконтактні засоби контролю для матеріалів із складною внутрішньою структурою та налаштовувати їх в автоматичному режимі на зміну розмірів пор, що може суттєво впливати на похибки таких приладів. На точність приладів, які будуть налаштовуватися на складну структуру контрольованого одношарового матеріалу, буде впливати саме параметр згасання зондуючих коливань. У майбутньому цей напрямок досліджень дозволить створювати безконтактні методи та засоби контролю технологічних параметрів різних одношарових матеріалів та інтегрувати такі прилади та системи безпосередньо у виробничий процес.

Ключові слова: одношаровий матеріал з малими порами, модулі комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль, текстильний одношаровий матеріал, відносна зміна амплітуд зондуючих коливань, згасання ультразвукових хвиль.

Вступ. Для багатьох засобів неруйнівного контролю, який базується на інформативних параметрах ультразвукових хвиль [1-3], важливим є точність та мобільність цих приладів, що застосовуються для його реалізації. Особливо це стосується безконтактних засобів контролю, точність яких забезпечується додержанням їхньої похибки в допустимих межах, на яку може впливати багато факторів [4-10], одним із яких є згасання зондуючих хвиль в контрольованому матеріалі. Визначення цього параметру є досить актуальним

завданням для можливості розробки нових методів та засобів безконтактного ультразвукового контролю одношарових матеріалів із складною структурою та різною пористістю.

Постановка завдання. Для одношарових полотен, що в основному виробляються вітчизняними текстильними підприємствами, згасання ультразвукових хвиль, які можуть застосовуватися для поперечного прозвучування такого текстилю, буде незначним. Це можна пояснити тим, що хоча згасання амплітуди хвиль в самих волокнах текстильних матеріалів може бути $\alpha_{\text{з.}} = 15 \text{ м}^{-1}$, але зважаючи на те, що більша частина коливань огинає нитки з волокнами текстильного матеріалу і проходить крізь наскрізні пори, то цим згасанням для результуючого ультразвукового сигналу можна знехтувати. Тому пік згасання амплітуди ультразвукових хвиль, що взаємодіють з одношаровими текстильними матеріалами, припадає на пологу частину залежностей модулів $|W|$, $|V|$ для текстильних матеріалів в діапазоні амплітуд хвиль, який підходить для контролю полотен. Таке згасання мало впливає на зміну амплітуд хвиль, яка не перевищує 1% за модулем для текстильних полотен. Разом з тим згасання для одношарових полімерних матеріалів з малими порами може суттєво впливати на зміну амплітуд хвиль, яка може перевищувати 60 % за модулем. Для уточнення цих показників, які стосуються згасання амплітуд зондуючих хвиль та можуть впливати на точність показів вимірювальних приладів при контролі одношарових пористих матеріалів, необхідно провести додаткові дослідження для встановлення граничних їх значень при взаємодії коливань з матеріалами з різною пористістю.

Результати дослідження. Дослідження згасання імпульсного ультразвукового сигналу при проходженні та відбитті хвиль під час їхньої взаємодії з різними контрольованими матеріалами є важливою задачею, вирішення якої дозволить поліпшити методи та точність безконтактних приладів, які застосовуватимуть для визначення основних технологічних параметрів композитних та текстильних матеріалів.

Для того, щоб провести детальний аналіз впливу згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що пройшли одношаровий матеріал з порами, до хвиль, які тільки падають на нього, потрібно спочатку представити комплексний коефіцієнт проходження коливань $W_p(\omega)$ у загальному його виді:

$$W_p(\omega) = \text{Re} W_p(\omega) + j \text{Im} W_p(\omega), \quad (1)$$

де $\text{Re} W_p(\omega)$, $\text{Im} W_p(\omega)$ – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту проходження ультразвукових хвиль крізь матеріал. Для знаходження такої залежності амплітудних співвідношень хвиль від колової частоти ω з врахуванням згасання $\alpha_{\text{з.}}$ для одношарового матеріалу з наскрізними порами, які можна охарактеризувати за допомогою параметру $\cos \nu$, що відображає проходження частини звукової енергії через пори, треба записати модуль $|W_p(\omega)|$ для такого матеріалу у вигляді:

$$|W_p(\omega)| = \sqrt{\text{Re} W_p(\omega)^2 + \text{Im} W_p(\omega)^2}, \quad (2)$$

або

$$|W_p(\omega)| = \left(\left(\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \left((2N+1) \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \times \right. \right. \\ \left. \times e^{-\alpha_{\text{з}} (2N+1) h_1 \cos \nu} \right)^2 + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \left((2N+1) \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \times \right. \\ \left. \times e^{-\alpha_{\text{з}} (2N+1) h_1 \cos \nu} \right)^2 \Bigg)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

де Z_1 – акустичний опір повітря; Z_2 – акустичний опір одношарового матеріалу з порами; N – кількість перевідбивань хвиль, що дорівнює 0, 1, 2, 3, ..., ∞ ; $\alpha_{\text{з}}$ – загальний коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль у матеріалі; h_1 – товщина одношарового матеріалу, що контролюється; c_2 – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в одношаровому контрольованому матеріалі; $b = \omega / \omega_0$ – коефіцієнт відношення несучої колової частоти та колової частоти заповнення імпульсного сигналу; ν – кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, і поверхнею одношарового матеріалу.

Якщо записувати модуль комплексного коефіцієнта проходження $|W_{\alpha\beta}(\omega)|$ для одношарової тканини з деформацією ниток та з різною фазовою будовою із умовною товщиною, яку можна представити сумою діаметру нитки основи та утку d_{oy} , то його можна показати у такому вигляді:

$$|W_{\alpha\beta}(\omega)| = \left(\left(\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \left((2N+1) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4c_2} \right) \times \right. \right. \\ \left. \times e^{-\alpha_{\text{з}} (2N+1) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right)^2 + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \left((2N+1) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4c_2} \right) \times \right. \\ \left. \times e^{-\alpha_{\text{з}} (2N+1) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right)^2 \Bigg)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Вираз (4), пов'язавши його з поверхневою густиною m_s самого текстильного полотна, можна подати як:

$$\begin{aligned}
 |W_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \times e^{-\alpha_{\beta} (2N+1) \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} \left. \right)^2 + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \times \right. \\
 & \times e^{-\alpha_{\beta} (2N+1) \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} \left. \right)^2 \left. \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Отримавши залежності співвідношень амплітуд ультразвукових хвиль, однієї, яка пройшла одношаровий матеріал, до іншої, що тільки падає на його поверхню, покажемо аналогічні вирази для співвідношень амплітуд відбитих коливань. Ці співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль пропорційні модулям $|V_p(\omega)|$, $|V_{\alpha\beta}(\omega)|$. Для того, щоб провести детальний аналіз впливу згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що відбилися від одношарового матеріалу, до хвиль, які тільки падають на нього, потрібно спочатку комплексний коефіцієнт відбиття коливань $V_p(\omega)$ показати у загальному вигляді з дійсною $ReV_p(\omega)$ та уявною $ImV_p(\omega)$ його частинами так:

$$V_p(\omega) = ReV_p(\omega) + j ImV_p(\omega). \tag{6}$$

Покажемо залежність амплітудного співвідношення хвиль від їхньої колової частоти ω з врахуванням згасання α_{β} для одношарового матеріалу з наскрізними порами, яке пропорційне модулю $|V_p(\omega)|$, який у загальному вигляді можна представити як:

$$|V_p(\omega)| = \sqrt{ReV_p(\omega)^2 + ImV_p(\omega)^2}, \tag{7}$$

або

$$\begin{aligned}
 |V_p(\omega)| = & \left(\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(2N \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \times \right. \right. \right. \\
 & \times e^{-\alpha_3 \cdot 2N h_1 \cos \nu} - \cos \left((2N+2) \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) h_1 \cos \nu} \left. \left. \right) \right)^2 + \\
 & + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\sin \left(2N \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot 2N h_1 \cos \nu} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \sin \left((2N+2) \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) h_1 \cos \nu} \right) \right)^2 \left. \right) \left. \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Якщо показати модуль комплексного коефіцієнта відбиття $|V_{\alpha\beta}(\omega)|$ для одношарової тканини із середньою умовною її товщиною d_{oy} , то його можна подати у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 |V_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(2N \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4 c_2} \right) \times \right. \right. \right. \\
 & \times e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} - \cos \left((2N+2) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4 c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \left. \left. \right) \right)^2 + \\
 & + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\sin \left(2N \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4 c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \sin \left((2N+2) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4 c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right) \right)^2 \left. \right) \left. \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Вираз (9) можна пов'язати з поверхневою густиною m_s самого текстильного полотна та показати як:

$$\begin{aligned}
 |V_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(2N \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \times \right. \right. \right. \\
 & \times e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} - \cos \left((2N+2) \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} \left. \left. \left. \right) \right)^2 + \right. \\
 & + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\sin \left(2N \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} - \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \sin \left((2N+2) \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \quad (10)$$

Отже, в роботі наведені вирази з врахуванням згасання для амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, до хвиль, які падають на нього, а також залежності співвідношень хвиль, які відбилися від матеріалу, до падаючих на нього коливань відповідно. Це дасть змогу проаналізувати амплітудні відносні зміни, викликані згасанням хвиль. Вплив цього згасання можна побачити за допомогою параметру амплітудної похибки (відносної зміни їх амплітуд), що спричинена ним.

У загальному вигляді ці відносні зміни для амплітуд хвиль, що пройшли крізь матеріал, та для амплітуд хвиль, які відбилися від матеріалу, можна представити так:

$$\delta |W(\omega)| = \frac{|W(\omega)| - |W(\omega)|_0}{|W(\omega)|_0} \cdot 100\%, \quad (11)$$

та

$$\delta |V(\omega)| = \frac{|V(\omega)| - |V(\omega)|_0}{|V(\omega)|_0} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де $\delta |W(\omega)|$ – відносна зміна модуля комплексного коефіцієнту проходження ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням; $\delta |V(\omega)|$ – відносна зміна модуля комплексного коефіцієнту відбиття ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням; $|W(\omega)|_0$, $|V(\omega)|_0$ – модулі комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття без врахування згасання хвиль в матеріалі ($\alpha_3 = 0$).

Приведемо два випадки відносних змін амплітуд хвиль (для різних за структурою матеріалів), використовуючи отриманні вирази для модулів комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття коливань. Позначення самих модулів $|W(\omega)|$ та $|V(\omega)|$ відповідних

коефіцієнтів із переходом запису колової частоти ω до f покажемо просто як $|W|$ і $|V|$, а величини $\delta |W(\omega)|$, $\delta |V(\omega)|$ подамо як $\delta |W|$ і $\delta |V|$.

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів для одношарових матеріалів з порами, після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти ω до f можна подати так:

$$\delta |W| = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2 h_1 \cos \nu}{Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (13)$$

$$\delta |V| = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{\pi f \rho_2 h_1 \cos \nu} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (14)$$

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів для тканин, які пов'язані з умовною товщиною d_{oy} , після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти ω до f можна подати так:

$$\delta |W| = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos \nu}{4 Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (15)$$

$$\delta |V| = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{4 Z_1}{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos \nu} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (16)$$

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів, для текстильних полотен, враховуючи залежності (15) та (16), пов'язавши їх з поверхневою густиною m_s , після їх спрощення можна подати так:

$$\delta |W| = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{K m_s f \cos \nu}{Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (17)$$

та

$$\delta |V| = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{K m_s f \cos \nu} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (18)$$

На рис.1 показано як впливає параметр згасання α_3 . (за екстремумами поверхні при $\alpha_3 = 0$ та $\alpha_3 = 15 \text{ м}^{-1}$) ультразвукових хвиль на їхні відносні похибки для амплітудних

співвідношень, які пропорційні модулям $|W|$, $|V|$, в залежності від зміни частоти f коливань в контрольованому матеріалі (від зміни довжини хвилі λ_2 в матеріалі з малими порами). Зміну згасання амплітуди від частоти хвиль краще визначати за параметром співвідношення товщини матеріалу до довжини хвилі h_1/λ_2 для матеріалів з плоским шаром (з малими порами або без них) та за параметром $m_s/(\rho_2\lambda_2)$ для текстильних матеріалів. На рис.1 показано як змінюється згасання амплітуди хвиль при зміні їх частоти в матеріалі полімерного плоского шару з малими порами, що може застосовуватися в композитах, а на рис. 2 показано як змінюється згасання у текстильному матеріалі з наскрізними порами.

Як видно з наведених поверхонь при малих порах в полімерному матеріалі проходження ультразвукових хвиль наближається до проходження коливань в суцільному матеріалі. Це відбувається тому, що хвилі, які проходять крізь малі пори, менше впливають на результуючий сигнал, ніж ті, що проходять крізь пори в текстильному матеріалі (при певному співвідношенні розмірів наскрізних пор та довжини ультразвукових хвиль). Частина ультразвукових хвиль, яка проходить крізь полімерний матеріал, зазнає значного згасання у порівнянні з текстильним полотном, тому що він не має міжволоконної пористості в своїй структурі, так як текстильні матеріали. Також треба зазначити, що умовна товщина текстильного шару може значно переважати товщину полімерного матеріалу в композиті, через який можна пропускати ультразвукові хвилі в процесі безконтактного контролю. Це зумовлено меншим згасанням ультразвукових коливань в шарі текстилю.

Згасання відбитих ультразвукових хвиль значно менше впливає на зміну величини модуля комплексного коефіцієнта відбиття $\delta|V|$, ніж на зміну величини модуля комплексного коефіцієнта проходження $\delta|W|$ хвиль крізь полімерний матеріал з малими порами (див. рис.1). Якщо порівнювати ці показники відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів ультразвукових хвиль з аналогічними для полотен, то для текстильних матеріалів різниця між $\delta|W|$ та $\delta|V|$ буде незначна, а їх величина буде значно меншою за ці показники для полімерних матеріалів з малими порами або без них.

Виходячи з наведеного у роботі матеріалу, доцільно зробити висновок, що згасанням ультразвукових хвиль при поперечному прозвучуванні текстильних полотен можна знехтувати. Середня швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль при такому прозвучуванні текстильного одношарового матеріалу буде наближатися до швидкості розповсюдження звукових хвиль у повітрі, оскільки більша частина коливань проходить саме крізь нього, оминаючи самі нитки матеріалу. Для матеріалів з різною внутрішньою структурою швидкість розповсюдження хвиль може змінюватись.

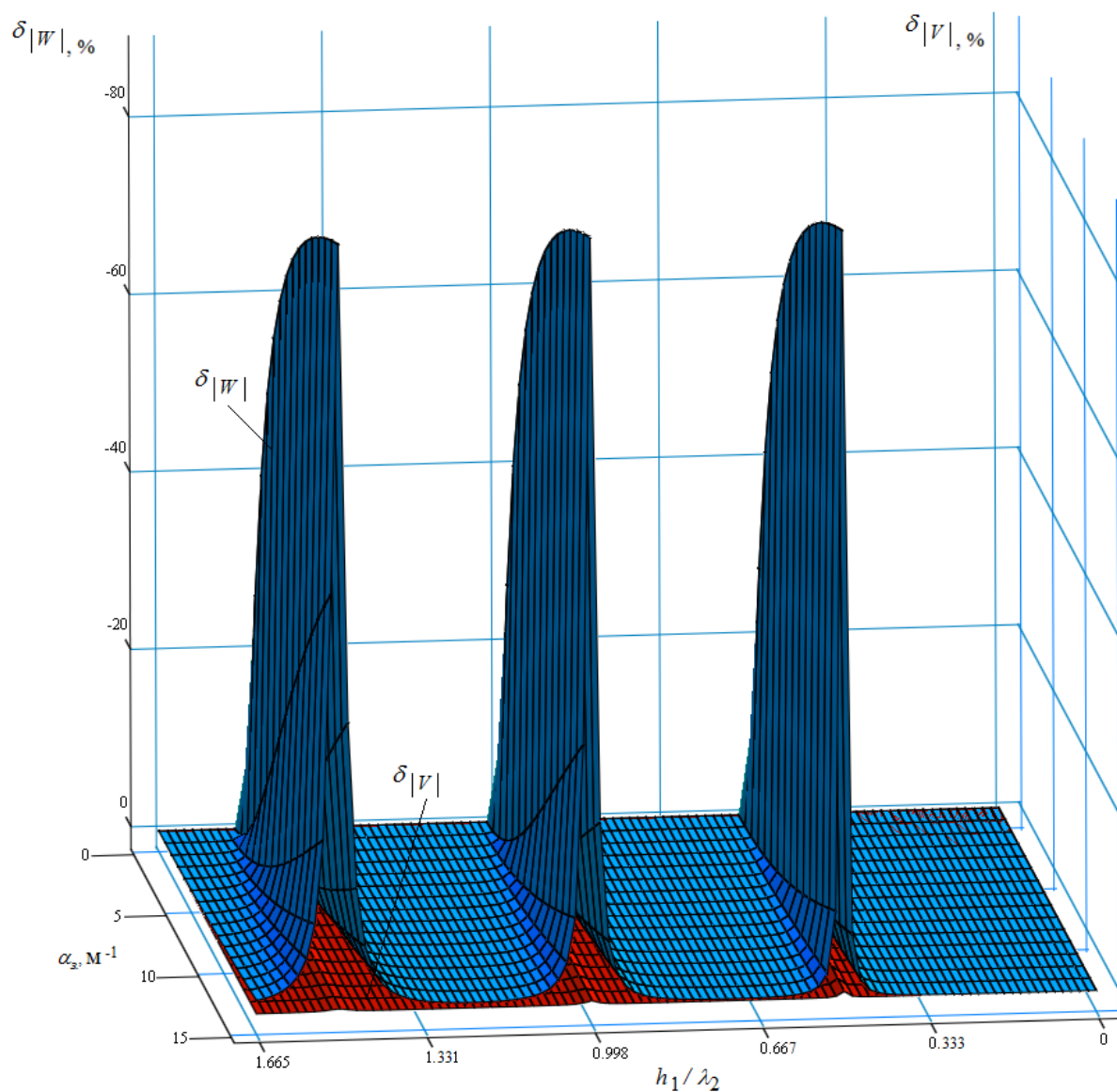


Рис. 1. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження $\delta |W|$ та відбиття $\delta |V|$ для полімерного матеріалу з малими порами від параметрів h_1 / λ_2 та α_3 .

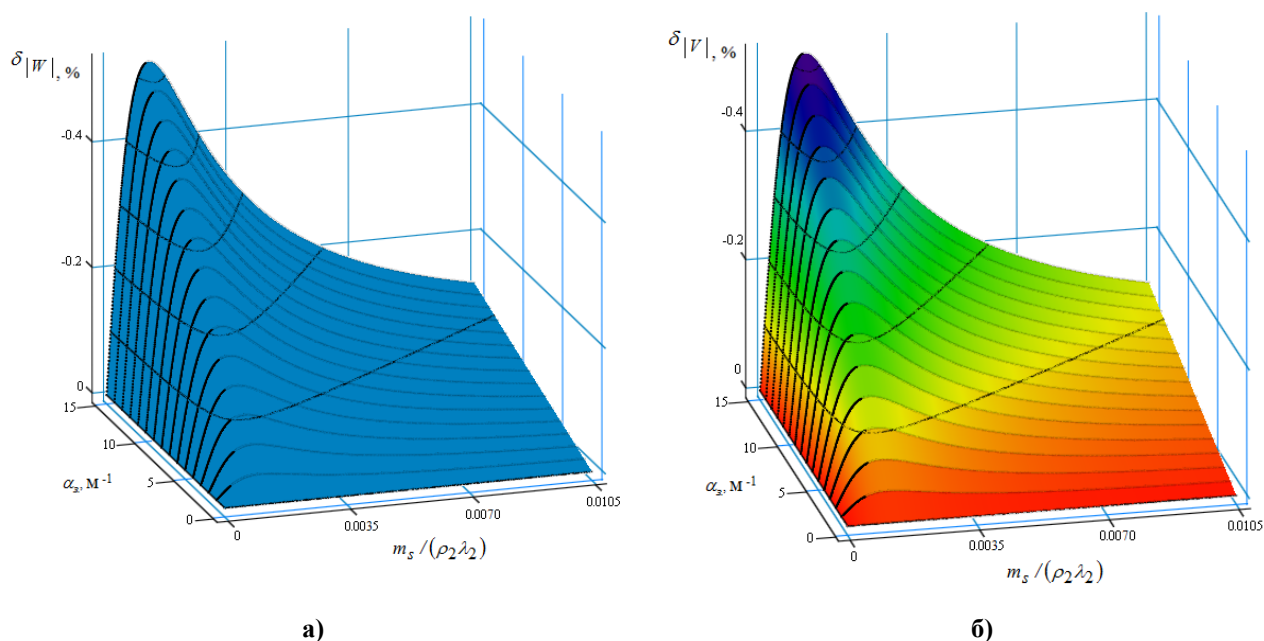


Рис. 2. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження $\delta|W|$ та відбиття

$\delta|V|$ для текстильних матеріалів від параметрів $m_s/(\rho_2\lambda_2)$ та α_3 :

а – залежність відносної зміни $\delta|W|$ від параметрів $m_s/(\rho_2\lambda_2)$ та α_3 ;

б – залежність відносної зміни $\delta|V|$ від параметрів $m_s/(\rho_2\lambda_2)$ та α_3 .

Висновки. Проаналізувавши зміну амплітуд ультразвукових хвиль в різних матеріалах, можна зробити висновок, що діапазон частот коливань, який можна використовувати для безконтактного контролю, та діапазони контрольованих параметрів матеріалів, які відповідають незначному амплітудному згасанню хвиль, можуть відрізняються між собою для текстилю та для плоского шару. Зазначене можна пояснити тим, що діапазон умовної товщини полотен, який визначається для можливості безконтактного поперечного прозвучування текстилю, може бути більшим за такий же діапазон для плоских одношарових матеріалів з малими порами та без них. Така відмінність між робочими діапазонами технологічних параметрів, які можна визначати безконтактно, спричинена внутрішньою структурою різних матеріалів. Це може впливати на здатність частини хвиль огинати сам матеріал. Проведені дослідження показали можливість використання малопотужних датчиків для визначення різних технологічних параметрів текстильних матеріалів без врахування згасання в них, що важливо при створенні нових засобів безконтактного контролю одношарових матеріалів з порами.

Література

1. Костюков А.Ф. Метод контроля технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2013. – № 1. – С. 96–

References

1. Kostukov, A.F. (2013). Metod kontrolya tehnologicheskikh parametrov selskohozyajstvennykh volokon s pomoshyu ultrazvuka [The method of monitoring the technological parameters of agricultural fibers using ultrasound]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State

- 99.
2. Кандрин Ю.В. Скорость распространения ультразвуковых колебаний в волоконной среде / Ю.В. Кандрин, О.В. Цымбалист, Н.П. Воробьев // Вестник АГАУ. – 2011. – № 1. – С. 95–98.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. — М.: Наука, — 1973. — 343 с.
4. Здоренко В.Г. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. — 2013. — №3. — С. 90—96.
5. Здоренко В.Г. Технологічний контроль текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко // Метрологія та прилади. — 2017. — №5. — С. 86 – 88.
6. Здоренко В.Г. Технологічний контроль пористості текстильних матеріалів із складною структурою / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, А.С. Дяченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2017. — №1. — С. 105 – 112.
7. Здоренко В.Г. Контроль технологічних параметрів тканини за допомогою ультразвукового адаптивного пристрою / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — №3. — С. 7 – 11.
8. Лютак І.З. Адаптивний алгоритм обробки виміряного ультразвукового сигналу в частотній області / І.З. Лютак, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. — 2006. — №16 – С. 15–18.
9. Шкарлет Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля / Ю.М. Шкарлет. — М.: Машиностроение, 1974. — 57 с.
10. Защепкіна Н.М. Ультразвуковий пристрій для технологічного контролю якості текстильних матеріалів / Н.М. Защепкіна, В.Г. Здоренко // Вісник КНУТД. — 2007. — №5(37). — С. 40 – 43.
- Agricultural University, 1, 96 — 99 [In Russian].
2. Kandrin, Yu.V., Tsybalyist O.V., & Vorobiev N.P. (2011). Skorost rasprostraneniya ultrazvukovykh kolebaniy v volokonnoy srede [The propagation velocity of ultrasonic vibrations in a fiber medium]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 1, 95 — 98 [In Russian].
3. Brekhovskikh, L.M. (1973). Volny v sloistyh sredah [The waves in layered medium]. Moscow: Nauka [In Russian].
4. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Doslidzhennya prohodzhennya impulsnogo ultrazvukovogo signalu kriz tkaninu pri kontroli poverhnevoyi shilnosti [Research of ultrasonic passing of pulsed signal through the fabric during the control of basis weight]. Visnik KhNU. — Herald of Khmelnytskyi national university, 3, 90 — 96 [In Ukrainian].
5. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2017). Tehnologichnij kontrol tekstilnih materialiv [Technological control of textile materials]. Metrologiya ta priladi. — Metrology and instruments, 5, 86 — 88 [In Ukrainian].
6. Zdorenko, V.G., Barylko, S.V., & Dyachenko A.S. (2017). Tehnologichnij kontrol poristosti tekstilnih materialiv iz skladnoyu strukturoyu [Technological control of porosity of textile materials with complex structure]. Visnik KhNTU. — Visnyk of Kherson National Technical University, 1, 105 — 112 [In Ukrainian].
7. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Kontrol tehnologichnih parametriv tkanini za dopomogoyu ultrazvukovogo adaptivnogo pristroyu [Control of the technological parameters of the fabric with the ultrasonic adaptive device]. Visnik Vinnickogo politechnichnogo institutu. — Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, 3, 7 — 11 [In Ukrainian].
8. Lutak, I.Z., & Kissel, I.S. (2006). Adaptivnij algoritm obrobki vimiryannogo ultrazvukovogo signalu v chastotnij oblasti [Adaptive algorithm for processing the measured ultrasonic signal in the frequency domain]. Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. — Methods and devices of quality control, 16, 15 — 18 [In Ukrainian].
9. Shkarlet, Yu.M. (1974). Beskontaktne metody ultrazvukovogo kontrolya [Non-contact ultrasonic testing methods]. Moscow: Mashinostroenie [In Russian].
10. Zashchepkina, N.N., & Zdorenko, V.G. (2007). Ultrazvukovij pristrij dlya tehnologichnogo kontrolyu yakosti tekstilnih materialiv [Ultrasonic device for technological control of the quality of textile materials]. Visnik KNUVD. — Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design, 5, 40 — 43 [In Ukrainian].

BARYLKO S.

poo4ta@bigmir.net

ORCID: 0000-0002-2785-5784

Kyiv National University of Technologies and Design

LISOVETS S.

ser.lis.290171@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3643-046X

Kyiv National University of Technologies and Design

ZDORENKO V.

alzd123@meta.ua

ORCID: 0000-0001-6508-4290

Kyiv National University of Technologies and Design

SHIPKO D.

kaks@knutd.com.ua

Kyiv National University of Technologies and Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ИХ ПРОХОЖДЕНИИ И ОТРАЖЕНИИ ОТ ОДНОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОРАМИ РАЗНОГО РАЗМЕРА

ЗДОРЕНКО В. Г., БАРЫЛКО С. В. ЛИСОВЕЦ С. Н., ШИПКО Д. А.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследовать как меняется затухание ультразвуковых волн в различных однослойных материалах с имеющимися порами разного размера. Указанное необходимо для возможности создания бесконтактных средств ультразвукового контроля таких материалов.

Методика. В работе для анализа процесса взаимодействия ультразвуковых волн с однослойными материалами с различными порами и для анализа изменения амплитудного затухания зондирующих колебаний использовался метод определения относительного изменения этого параметра с учетом толщины или поверхностной плотности материала.

Результаты. Приведены выражения для модулей комплексного коэффициента прохождения и отражения ультразвуковых волн от однослойных материалов с малыми порами, а также от текстильных однослойных материалов со сквозными порами, через которые проходит большая часть колебаний. Приведены зависимости относительных изменений амплитудных затуханий волн от частоты колебаний, толщины и поверхностной плотности материала. Показано, что затухание амплитуды ультразвуковых волн, которые взаимодействуют с однослойными материалами с малыми порами, и затухание колебаний для однослойных текстильных полотен могут сильно отличаться друг от друга. Эта разница вызвана огибанием части звуковых волн самих волокон текстильных полотен со сквозными порами при взаимодействии с ними зондирующих колебаний.

Научная новизна. Получены зависимости относительных изменений разницы модулей с учетом затухания и без него для комплексных коэффициентов отражения и прохождения ультразвуковых волн. Указанные колебания, взаимодействующих с однослойными материалами с различными порами, рассматриваются с учетом частоты ультразвуковых волн, размеров пор, толщины или поверхностной плотности самого материала.

Практическая значимость. Полученные зависимости для определения затухания амплитуды зондирующих ультразвуковых волн от структуры, пористости материала, его толщины или поверхностной плотности. Это позволит создавать бесконтактные средства контроля для материалов со сложной внутренней структурой и настраивать их в автоматическом режиме на изменение размеров пор, что может существенно влиять на погрешности таких приборов. На точность приборов, которые будут настраиваться на сложную структуру контролируемого однослойного материала, будет влиять именно параметр затухания зондирующих колебаний. В будущем это направление исследований позволит создавать бесконтактные методы и средства контроля технологических параметров различных однослойных материалов и интегрировать такие приборы и системы непосредственно в производственный процесс.

Ключевые слова: однослойный материал с малыми порами, модули комплексных коэффициентов прохождения и отражения волн, текстильный однослойный материал, относительное изменение амплитуд зондирующих колебаний, затухание ультразвуковых волн.

RESEARCH OF ATTENUATION OF ULTRASONIC WAVES AT THEIR PASSAGE AND REFLECTION FROM SINGLE-LAYERED MATERIALS WITH PORES OF DIFFERENT SIZES

ZDORENKO V. G., BARYLKO S. V., LISOVETS S. N., SHIPKO D. A.

Kyiv National University of Technologies & Design

Purpose. Research of attenuation of ultrasonic waves in various single-layer materials with available pores of different sizes changes in this work. The above is necessary for the possibility of creating non-contact means of ultrasonic testing of such materials.

Methodology. In the work to analyze the processes of interaction of ultrasonic waves with single-layer materials and various changes depending on the thickness or basis weight of the material.

Findings. Expressions are given for the modules of the complex coefficient of transmission and reflection of ultrasonic waves from single-layer materials with small pores, as well as from textile single-layer materials with through pores, through which most of the vibrations pass. The dependences of relative changes in the amplitude attenuation of waves on the oscillation frequency, thickness and basis weight of the material are given. It is shown that the attenuation of the amplitude of ultrasonic waves that interact with single-layer materials with small pores, and the damping of vibrations for single-layer textile fabrics can be very different from each other. This difference is caused by the bending of part of the sound waves of the fibers of textile fabrics with through pores during the interaction of vibrations.

Originality. The dependences of the relative changes in the difference of the modules with and without attenuation are obtained for the complex reflection and transmission coefficients of ultrasonic waves. These vibrations interacting with single-layer materials with different pores are considered taking into account the frequency of ultrasonic waves, pore sizes, thickness or basis weight of the material itself.

Practical value. The obtained dependences for determining the attenuation of the amplitude of the probe ultrasonic waves on the structure, porosity of the material, its thickness or surface density. This will allow to create non-contact control tools for materials with complex internal structures and automatically configure them to change pore sizes, which can significantly affect the errors of such devices. The accuracy of the devices that will be tuned to the complex structure of the monolayer material being controlled will be affected precisely by the attenuation parameter of the probe oscillations. In the future, this line of research will make it possible to create non-contact methods and means of monitoring the technological parameters of various single-layer materials and integrate such devices and systems directly into the production process.

Keywords: single-layer material with small pores, modules of complex transmission and reflection coefficients of waves, textile single-layer material, relative change in the amplitudes of sounding vibrations, attenuation of ultrasonic waves.

УДК 677.076

СУМСЬКА О. П., ФЕЩУК Ю. А., ГІБЕЛІНДА О. А.,
ПАНЧЕНКО Н. В.

Херсонський національний технічний університет
**ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ
НАНОРОЗМІРНИХ ОРГАНОСИЛІКОНОВИХ
ПОМ'ЯКШУВАЧІВ**

Мета. Визначити вплив нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів на технологічні характеристики трикотажного полотна та оцінити можливість їх поліпшення шляхом застосування інноваційного завершального оброблення.

Методика. Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на основних положеннях текстильного матеріалознавства. При експериментальних дослідженнях використані стандартизовані методи і методики, що відтворюють у лабораторних умовах надання пом'якшувальної обробки трикотажним полотнам. Технологічний процес шиття було виконано на промисловій швейній машині Juki DLL-8100e. Частоту стібків строчки визначали реєстраційним методом.

Результати. Визначено, що застосування нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів поліпшує технологічні характеристики трикотажного полотна. Встановлено, що нанорозмірний органосиліконовий пом'якшувач Колосил, який використовували за методом вибирання в концентрації 4% від оброблюваного матеріалу, суттєво впливає на повну деформацію і підвищує частку повільно-оборотної складової деформації. Показано, що застосування пом'якшувачів позитивно впливає на стабільність лінійних розмірів трикотажного полотна. Доведено, що завершальну обробку трикотажного полотна інноваційними нанорозмірними органосиліконовими пом'якшувачами можна вважати фактором зниження технологічної трудомісткості швейних виробів.

Наукова новизна. Наукова гіпотеза отримала експериментальне підтвердження у застосуванні нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів для поліпшення технологічних характеристик трикотажного полотна. Показано, що обробка нанорозмірними пом'якшувачами викликає зміни у структурі волокон на мікрорівні, які мають першорядне значення для формування технологічних властивостей трикотажного полотна.

Практична значущість. Результати досліджень можуть використовуватися у розробці нових матеріалів з удосконаленими властивостями, при конструюванні деталей одягу та пошитті виробів з трикотажного полотна.

Ключові слова: деформаційні властивості, стабільність лінійних розмірів, продуктивність швейної машини, нанотекстиль.

Вступ. Трикотажна промисловість виробляє широкий асортимент найрізноманітніших виробів, багато з яких є незамінними або більш бажаними, ніж вироби, вироблені з тканини. Проведені системні дослідження показали, що на якість швейних виробів з трикотажних полотен впливає безліч факторів технологічного характеру. Виконання планів збільшення обсягу швейного виробництва, підвищення продуктивності праці, поліпшення якості та розширення асортименту продукції в значній мірі залежить від технологічних характеристик трикотажного полотна, що використовується.

Високоякісну продукцію можна випустити тільки з якісних матеріалів або, беручи до уваги певні негативні характеристики матеріалу, використовувати дані трикотажні полотна для певного виду виробів з урахуванням їх призначення та застосовуючи методи обробки, які нівелюють недоліки вихідної сировини. Матеріали можуть несподівано проявити

властивості, які в значній мірі погіршують перебіг технологічного процесу і знижують споживчі властивості готового виробу.

Із залученням експертів з числа інженерно-технічних працівників швейних підприємств, викладачів та аспірантів кафедри експертизи, технології і дизайну текстилю, обрана група показників технологічних властивостей трикотажного полотна, умовно названа базовою. З двадцяти раніше виявлених показників у базову групу увійшли дев'ять. Проведене експертне опитування дозволило оцінити значущість базових технологічних показників, встановивши рангову оцінку для кожного показника. Для більш об'єктивної оцінки при опитуванні експертів, з метою спрощення ними вибору, показники оцінювалися двічі. Перший - оцінка на етапі проєктування виробу (моделювання, конструювання та конфекціювання), другий - на етапі безпосереднього виготовлення (розкрійний, підготовчий і швейний цех). Узагальнюючи результати ранжування ступеня впливу виробничо-технологічних факторів на якість швейних виробів, зовнішній вигляд, розмірну точність та формостійкість готових швейних виробів з трикотажних полотен, а також їх собівартість слід зазначити, що основними факторами визначено: деформаційні властивості; стабільність лінійних розмірів та вплив матеріалу на продуктивність швейної машини.

Для різних видів трикотажних полотен величина деформацій коливається за своїми значеннями. Тому для забезпечення необхідної релаксації деформацій в матеріалах необхідно оцінювати їх деформаційно-релаксаційні властивості в умовах швейного виробництва. Це важливо ще й тому, що полотна, що надходять у технологічне виробництво для переробки в деталі одягу, як правило, мають деформаційну передісторію, а також додаткові деформації полотен випробовують безпосередньо при виконанні підготовчо-розкрійних операцій.

Стабільність лінійних розмірів текстильних матеріалів загально визнано є одним з важливих показників їх якості. Трикотажні полотна мають більш високу розтяжність, ніж тканини, більш рухливу структуру, чутливу навіть до незначних докладених зусиль. Тканини, що мають велике розтягнення навіть при малих навантаженнях, є складними в розкрої й пошитті, вони легко отримують перекося, розтягуються у швах, легко деформуються. При конструюванні швейних виробів необхідно передбачати припуски, що враховують усадку матеріалу в готовому виробі й при волого-тепловій обробці в процесі виробництва. Крім того, в результаті аналізу якості швейно-трикотажних виробів виявлено, що п'ята частина (19,2%) всіх претензій споживачів пред'являється через зміни лінійних розмірів і форми виробу в процесі його експлуатації (як правило, після першого прання).

Зважаючи на те, що усадка і притяжка здійснюють значний вплив на формостійкість і розміростабільність швейних виробів у процесі експлуатації та викликають ряд труднощів у технологічному процесі їх виробництва, визначенню лінійних розмірів трикотажних полотен приділяється значна увага з боку дослідників, але при цьому не менш важливими залишаються питання розробки технологічних засобів, щодо стабілізації лінійних розмірів трикотажних полотен.

Промислове швейне виробництво на сучасному етапі розвивається у напрямку виготовлення швейної продукції високої (оптимальної) якості при мінімальних ресурсних затратах. При цьому відбувається перерозподіл функцій і відповідальності за отримання кінцевого позитивного результату в процесі виконання технологічних операцій швейного

виробництва (стабільно високого та прогнозованого рівня якості та продуктивності) в системі «людина – машина – виробниче середовище». Вищезазначене є підґрунтям доцільності проведення досліджень щодо впливу властивостей трикотажного полотна на продуктивність швейної машини.

Аналіз останніх публікацій. Комплекс властивостей трикотажних полотен формується у процесі їх проєктування і вироблення. Факторами формування технологічних і споживних властивостей є: волокнистий склад, структура текстильних ниток, будова трикотажних полотен, особливості їх обробки.

Покращенню властивостей трикотажного полотна за рахунок використання сировини присвячено роботи [1-4]. Авторами [5,6] досліджено характер зміни лінійних розмірів після вологих обробок трикотажу з вмістом бамбукової пряжі. Запропоновано структуру трикотажу, що дозволяє одержати трикотажний виріб, у якому бамбукова пряжа виходить на виворотну сторону, до тіла людини, та надає виробу природні протиалергійні та бактерицидні властивості бамбуку, а бавовняна пряжа дозволяє підвищити формостійкість та зменшити зміну лінійних розмірів трикотажу після волого-теплової обробки. Таким чином, авторам роботи вдалося одночасно вдосконалити і споживні і технологічні властивості трикотажу.

Крім того, на властивості трикотажних полотен чинять певний вплив окремі технологічні особливості виконання тих чи інших виробничих операцій на всіх етапах виробництва. Так, в Київському національному університеті технологій та дизайну, з метою розробки певних рекомендацій щодо виготовлення трикотажу підвищеної міцності визначено вплив структури трикотажу, виготовленого при різних технологічних параметрах роботи в'язального устаткування на його деформаційні властивості. Авторами роботи [7] встановлено, що збільшення рівня глибини кулірування призводить до пропорційного зростання величини деформації під дією прикладеного розтягуючого зусилля та релаксації деформації після зняття навантаження. Це дає можливість прогнозувати деформаційні характеристики трикотажу підвищеної міцності у відповідності до обраної щільності його в'язання. У статті [8] представлено результати дослідження деформації основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, який утворено чергуванням рядів трико та ланцюжка в рапорті і в якому утокова нитка розташовується в структурі трикотажу без обвивання протяжок петель ґрунтового переплетення. Встановлено залежності досліджуваних параметрів від рапорту філейного переплетення та варіанту розташування утокової нитки.

Слід відзначити, що на властивості трикотажних полотен в значній мірі має суттєвий вплив використання сучасних прогресивних технологій опорядження текстильних матеріалів. Особливу роль в опорядженні тканин займає завершальне оброблення, де остаточно формуються споживні властивості готових текстильних виробів [9,10]. Але на сьогодні, високоякісне опорядження має передбачати не лише надання текстильним матеріалам принадності і комплексу необхідних споживних якостей, але й високих технологічних властивостей матеріалів, тобто комплексу фізико-хімічних властивостей цих матеріалів, зумовлених станом, складом і структурою в процесі взаємодії з технологічним середовищем, тобто під час їх оброблення.

З цієї позиції викликає інтерес використання пом'якшувачів у завершальному обробленні текстильних матеріалів. Останнє покоління пом'якшувачів - препарати на основі

силіконових еластомерів. До цієї групи належать: солюсофти (фірми "Хехст"), целлолюб СІ (фірма "Танатекс"), сандоперми FE, FEN, FES, ME, MEI (фірма "Кларіант"), ультратекс (фірма "Циба-Гейгі"). Асортимент пом'якшувачів для текстильної промисловості досить широкий, але не зупиняються наукові пошуки більш сучасних, ефективних, фізіологічно і екологічно нешкідливих речовин. З досягненнями в галузі органічної хімії були створені нові сполуки, які могли б більш ефективно пом'якшувати тканини. У статті [11] показано вплив двох рівнів концентрації для шести комерційних пом'якшувачів на бавовняні трикотажні полотна. Властивості полотна оцінювали із застосуванням системи оцінки «Kawabata» для полотен (KES-FB). Виявлено, що застосування пом'якшувачів знижує згинальні властивості трикотажного полотна з блокуванням через зменшення тертя між нитками в результаті ефекту «мастила».

Вивчено вплив двох пом'якшувачів (катіонного і кремнієвого) двох концентрацій: (3 %, 6 %) на силу тертя тканини і силу проникнення голки при шитті. Результати показали, що обробка кремнієвим пом'якшувачем призводить до значного зменшення сили проникнення голки при шитті в полотно. Показано, що під впливом пом'якшувальної обробки трикотажного полотна підвищується його ковзкість [12]. Автори робіт [13-15] досліджували вплив наявності опоряджувальних препаратів на трикотажних полотнах на силу проникнення швейної голки при шитті. Автори роботи [16] вивчали вплив пом'якшувальної обробки на властивості трикотажного полотна з 100 % бавовни, спандекса з половинним покриттям та спандекса з повним покриттям. Результати показали, що обробка кремній вмісним пом'якшувачем дає високі показники для трикотажних полотен з 100% бавовни, половинно- і повністю покритих.

Авторами роботи [17] відзначено, що для повного вирішення проблеми вдосконалення пошивних властивостей трикотажних полотен пом'якшувальна обробка є найбільш важливим кроком.

Нині ринок України переповнений імпортованими препаратами для обробки текстильних матеріалів, про хімічний склад і токсичність яких майже немає інформації. Водночас в Україні налагоджено виробництво широкого асортименту текстильно-допоміжних речовин, зокрема препарату Колософт П (ДП «Хімтекс», Херсон). Тому, авторами роботи [18] виконано дослідження впливу авіажної обробки препаратом Колософт П на пошивні властивості трикотажних полотен. Предметом дослідження були обрані зразки бавовняного трикотажного полотна «інтерлок», що використовується для виготовлення виробів на підприємстві "Маламода", м. Херсон. Як свідчать отримані дані, в результаті прокладання строчки на швейній машині ковзання трикотажного полотна під лапкою швейної машини підвищується, але на деформацію трикотажного полотна вздовж петельних стовпчиків обробка препаратом Колософт П впливає неоднозначно.

У той же час слід зазначити, що до текстильних процесів і матеріалів сьогодні вже не тільки перспективний науково-технічний напрям, але і реалії комерційної «ніші», яка інтенсивно розвивається – це нанотехнології [19]. Розвинуті країни світу позиціонують нанотехнології як пріоритетний напрямок розвитку науки та техніки та впроваджують державні програми їх розвитку. У дослідженні [20], метою якого було обґрунтування подальших розробок та впровадження нанотехнологій у текстильне виробництво, проведено аналіз існуючих товарів на ринку та технологій їх виробництва, визначено асортимент

готової текстильної продукції, для виготовлення якої використовують нанотехнології, а також сформульовано пріоритетні напрямки досліджень у виробництві нанотекстилю.

В Україні дослідження в області впровадження нанотехнологій в текстильну галузь проводять на базі Київського національного університету технологій і дизайну (КНУТД) та Хмельницького національного університету (ХНУ). У КНУТД займаються дослідженнями поліпропіленових мікрОВОЛОКОН наповнених вуглецевими нанотрубками та їх властивостей [21], впливу нанодисперсійної бактерицидної добавки срібло/глинозем на властивості поліпропіленових ниток [22], розробкою нового асортименту синтетичних ниток, модифікованих нанопрепаратами [23]. Слід відзначити колективну співпрацю науковців з декілька закладів вищої освіти України в напрямку створення обладнання, яке може бути використане для модифікації природних волокнистих матеріалів наночастинками іонів металів (AgJ, CuJ) з метою надання бактерицидних і фунгіцидних властивостей волокнистим матеріалам [24].

Протягом останніх років впровадження нанотехнологій стимулювало значні зміни і нововведення в текстильній галузі. Завдяки використанню нанотехнологій відбулася розробка тканин з певними покращеними властивостями, такими як міцність, м'якість, стійкістю до стирання та зминання, а також надання текстильним матеріалам повітропроникності, водовідштовхувальних властивостей, вогнестійкості, антимікробних властивостей і т.п.

Постановка завдання. Приведений вище аналіз дозволив сформулювати пріоритетний напрямок досліджень щодо впровадження нанотехнологій у виробництво текстильних матеріалів, а саме модифікація поверхні природних волокон нанорозмірними текстильно-допоміжними речовинами з метою покращення або надання нових властивостей.

Аналіз сучасної науково-технічної літератури дозволяє висунути гіпотезу, що висока ефективність надання комплексу властивостей трикотажним полотнам може бути досягнута за допомогою препаратів нового покоління з розмірами частинок, близькими до наносистем. Наноемульсії (колоїдні системи) - у виробництві текстильних матеріалів це модифікатори поверхні. Цю гіпотезу найбільш доцільно перевірити на прикладі використання силіконових наноемульсій для м'якшення трикотажного бавовняного полотна. Нові силіконові наноемульсії отримують шляхом модифікації хімічної структури традиційних амінокремнійорганічних полімерів при введенні в них нових функціональних груп. В результаті отримана система набуває здатності до самоемульгування і має розміри частинок дисперсної фази, що відповідає переходу з області мікроемульсій (менше 50 нм) в нанорозмірну область (менше 20 нм) [25]. При обробці таким препаратом текстильному матеріалу надається м'який гриф, еластичність, стійкість лінійних розмірів до мокрих обробок. Відмінною рисою застосування оздоблювальних наноемульсій є комплексний характер їх дії, коли в результаті однократного аппретування текстильному матеріалу надається одночасно кілька нових необхідних властивостей.

Виходячи з цього, актуально оцінити застосування нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів як фактор вдосконалення показників технологічних властивостей трикотажного полотна.

Мета дослідження. Визначити вплив нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів на технологічні характеристики трикотажного полотна та оцінити можливість їх поліпшення шляхом застосування інноваційного завершального оброблення.

Методологія дослідження. Для дослідження впливу пом'якшувальної обробки на комплекс властивостей було використано бавовняне трикотажне полотно з заправними параметрами: переплетення – кулірна гладь; лінійна густина пряжі, текс- 29,1 х 2; поверхнева густина – 198,5 г/м²; щільність по горизонталі, петельних стовпчиків – 46; щільність по вертикалі, петельних рядків – 62; петельний крок, А, мм – 1,42, висота петельного ряду, В, мм - 1,03 мм; довжина нитки в петлі, мм – 5,9; діаметр нитки в петлі, мм – 0,312; об'єм пряжі в петлі, W, мм³ – 0,46; об'ємне заповнення, E, % - 46,4; загальна пористість, R, % - 52,7.

Трикотажне полотно підлягало обробці трьома різними пом'якшувачами: Колософтом П (поліетиленова емульсія) і нанорозмірними органосиліконовими емульсіями: Колосил макро і Колосил (ДП «Хімтекс», Херсон), методами вибирання і плюсування.

Пом'якшувальна обробка за методом вибирання проводилося в лабораторних умовах з концентраціями 2 і 4% препарату від маси оброблюваного матеріалу при температурі 40° С протягом 20 хв. Пом'якшувальна обробка за методом плюсування проводилося в лабораторних умовах шляхом просочення зразків трикотажного полотна розчинами пом'якшувачів на лабораторній плюсовці при температурі апрету 40° С з концентраціями 20 і 40 г/л. Далі, зразки, що оброблялися за методом вибирання і методом плюсування підлягали однаковим технологічним операціям: зневодненню між валами лабораторної плюсовки до остаточного вмісту вологи 90% і подальшій сушці в термостаті гарячим повітрям при температурі 90 ± 5 ° С.

Для проведення досліджень усі зразки приведено в умовно-рівноважний стан шляхом прання та прасування без тиску. Усі дослідження показників структури полотна та фізико-механічних властивостей проводили в нормальних кліматичних умовах. Заправні дані трикотажного полотна визначали по ГОСТ 8846-87 «Полотна і вироби трикотажні. Методи визначення лінійних розмірів, перекоосу, числа петельних рядів і петельних стовпчиків і довжини нитки в петлі». Товщину нитки в петлі, щільність по горизонталі, по вертикалі і об'єм г нитки в петлі розраховували за відповідними формулами.

Показники розтяжності при навантаженні, яке менше за розривне, визначали на підставі даних експерименту, який проведено на релаксометрі типу «стійка» відповідно до ГОСТ 8847-85. Зміну лінійних розмірів текстильних полотен після мокрих обробок визначали відповідно до ДСТУ ГОСТ 30157.0:2003 Полотна текстильні. Методи визначання зміни розмірів після мокрих оброблень або хімічного чищення. Оброблені зразки були зшиті за допомогою стібків на промисловій швейній машині Juki DLL-8100e. Використовувалася поліефірна швейна нитка і кулькова голка DBx1 №90. Для визначення частоти стібків у строчці застосовували реєстраційний метод.

Результати досліджень та їх обговорення. Релаксаційні процеси спостерігаються при всіх видах впливів на матеріал (розтягнення, вигин, стиснення та ін.) і є їх характерною особливістю. Легка деформація трикотажних полотен викликає ряд особливостей технологічного процесу виготовлення виробів. Ці процеси у текстильних матеріалах дуже впливають як на якість виготовлення, так і на експлуатацію швейних виробів. Для оцінки

пружних властивостей текстильних матеріалів при одноциклових дослідженнях найбільше використовують повну деформацію та її складові частини.

Доцільним є вивчення складових частин деформації, якій піддаються трикотажні полотна без завершального оброблення і оброблені сучасними пом'якшувачами. З цією метою за допомогою релаксометра виміряно в мм повну деформацію і її складові на смужках трикотажного полотна при розтягуванні у напрямку петельних рядів та стовпчиків, і на основі отриманих даних розраховані частки кожного виду деформації (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив пом'якшувачів на складові повної деформації трикотажного полотна

Пом'якшувач	Метод обробки	Концентрація пом'якшувача	Повна деформація, ϵ , %	Складові частини деформації, %			Частка складової частини деформації, Δ		
				$\epsilon_{\text{шв.об.}}$	$\epsilon_{\text{пов.об.}}$	$\epsilon_{\text{зал.}}$	$\epsilon_{\text{шв.об.}}$	$\epsilon_{\text{пов.об.}}$	$\epsilon_{\text{зал.}}$
Розтягування вздовж									
Необроблений зразок			68	53	8	10	0,779	0,118	0,147
Коло-софт П	вибирання	2%	66	51	9	6	0,773	0,136	0,091
		4%	64	50	9	5	0,781	0,141	0,078
	плюсування	20 г/л	65	51	9	5	0,785	0,138	0,077
		40 г/л	65	50	10	5	0,769	0,154	0,077
Коло-сил Макро	вибирання	2%	66	51	10	5	0,788	0,152	0,075
		4%	63	48	10	5	0,762	0,159	0,079
	плюсування	20 г/л	61	46	9	5	0,754	0,148	0,082
		40 г/л	60	45	10	5	0,750	0,167	0,083
Колосил	вибирання	2%	59	45	12	4	0,763	0,203	0,068
		4%	55	39	14	2	0,709	0,250	0,050
	плюсування	20 г/л	58	42	12	4	0,724	0,207	0,086
		40 г/л	57	41	13	3	0,720	0,228	0,053
Розтягування уперек									
Необроблений зразок			147	115	26	15	0,782	0,177	0,102
Коло-софт П	вибирання	2%	135	85	30	14	0,630	0,222	0,104
		4%	128	81	35	12	0,632	0,273	0,094
	плюсування	20 г/л	135	82	32	15	0,607	0,237	0,111
		40 г/л	126	81	32	13	0,643	0,254	0,103
Коло-сил Макро	вибирання	2%	127	81	33	13	0,638	0,260	0,102
		4%	122	78	35	12	0,639	0,287	0,098
	плюсування	20 г/л	128	82	33	13	0,641	0,258	0,102
		40 г/л	118	73	33	12	0,620	0,280	0,102
Колосил	вибирання	2%	112	70	30	12	0,625	0,268	0,107
		4%	108	66	31	11	0,611	0,287	0,102
	плюсування	20 г/л	115	74	28	13	0,643	0,243	0,113
		40 г/л	111	69	31	11	0,721	0,279	0,099

Результати експерименту показують, що повна деформація полотен при розтягуванні по ширині полотна (уздовж петельного ряду) вище ніж повна деформація полотен при розтягуванні по довжині полотна (уздовж петельного стовпчика). Деформація по ширині

майже в 2 рази перевищує деформацію по довжині. При цьому завершальна обробка пом'якшувачами значно впливає на величину показника загальної деформації. Максимальна різниця в показниках складає для загальної деформації по ширині полотна 39%, по довжині полотна 13%. Максимальна різниця в показниках спостерігається, як по ширині, так і по довжині трикотажного полотна при завершальному обробленні шляхом застосування нанорозмірного органосиліконового пом'якшувача Колосил, який використовували за методом вибирання в концентрації 4% від оброблюваного матеріалу.

Повна деформація текстильних матеріалів зазвичай складається з трьох компонентів: швидко-оборотна, повільно-оборотна й залишкова. Співвідношення складових частин повної деформації матеріалу має велике значення для характеристик його механічних властивостей. Чим більша частка частин швидко-оборотної та повільно-оборотної деформацій матеріалу, тим краще виріб з цього матеріалу зберігає розміри і форму. Переважання залишкової частини повної деформації матеріалу призводить до зміни розмірів та форми швейного виробу в процесі його експлуатації і потребує коригування при проектуванні та розкрої.

Термін "структура" в матеріалознавстві трактується дуже широко. Структуру матеріалу вивчають на трьох рівнях: макро рівні - макроструктура - будова матеріалу, яку видно неозброєним оком; мікро рівні - мікроструктура - будова матеріалу, яку видно через мікроскоп; внутрішня структура - будова речовини, що вивчається на молекулярно-іонному рівні (фізико-хімічні методи дослідження - електронний мікроскоп, термогравіметрія, рентгеноструктурний аналіз і т.д.)

У текстильному матеріалознавстві під терміном "макроструктура" мають на увазі взаємне розташування елементів, які складають той чи інший матеріал. За макроструктурою (10-0,1 мм) текстильні матеріали підрозділяють на матеріали грубої (10-0,25 мм) і тонкої (0,25-0,1 мм) макроструктури.

Трикотажна структура являє собою досить складну систему. У даний час основою для розробок моделі петлі служать силовий, геометричний та енергетичний підходи. Однак, успішне застосування силових та енергетичних методів не може говорити про недосконалість розгляду геометрії структури кулірної петлі. Геометрична модель петлі використовується в основі теоретичного універсального методу проектування трикотажу професора А.С. Далідовича. У цьому методі петля розглядається як сукупність відрізків та дуг, у тому числі використовується геометрична модель петлі. Даний метод заснований на припущенні про те, що петля в рівноважному стані буде прагнути зайняти максимально можливу площу за рахунок сил, що сприяють розпрямленню зігнутої нитки на всіх її ділянках [26].

Зарубіжні дослідники опублікували свої геометричні моделі для переплетення - кулірна гладь [27-30]. Автори [31] пропонують ефективне представлення трикотажного полотна, яке розглядає компактне зображення геометрії та кінематики пряжі, фіксуючи основні види деформації петель. Автори відзначають, що механічна поведінка трикотажних матеріалів у значній мірі визначається контактом пряжі з пряжею з трьома домінуючими ефектами: контакт у точці переплетення, контакт між сусідніми петлями при затягуванні петлі та тертя при ковзанні або зсуві між пряжею. Макроскопічна деформація в площині (розтягування і зрушення) трикотажного полотна визначається перш за все опором пряжі

вигину, коли петлі деформуються, потім сусідні петлі можуть входити у контакт, і, нарешті, додаткова деформація вимагає розтягування самих ниток.

Таким чином, приймаючи до уваги результати, що наведено у табл.1, можна стверджувати, що подовження трикотажу, який досліджували, особливо в перший період розтягування, відбувається головним чином через макроскопічні зміни в його грубій макроструктурі, сформованій з пряжі, зігнутої у елементи петельної структури у відповідності до виду переплетення.

Аналізуючи наведені в табл.1 показники швидкооборотної деформації, слід відзначити, що досліджувані пом'якшувачі практично не впливають на частку швидкооборотної деформації. Але на частку повільно-оборотної деформації вплив пом'якшувачів достатньо суттєвий. Найбільш значний вплив на частку повільно-оборотної деформації спостерігається у трикотажного полотна, яке було піддане завершальному обробленню з використанням пом'якшувача Колосил (рис.1).

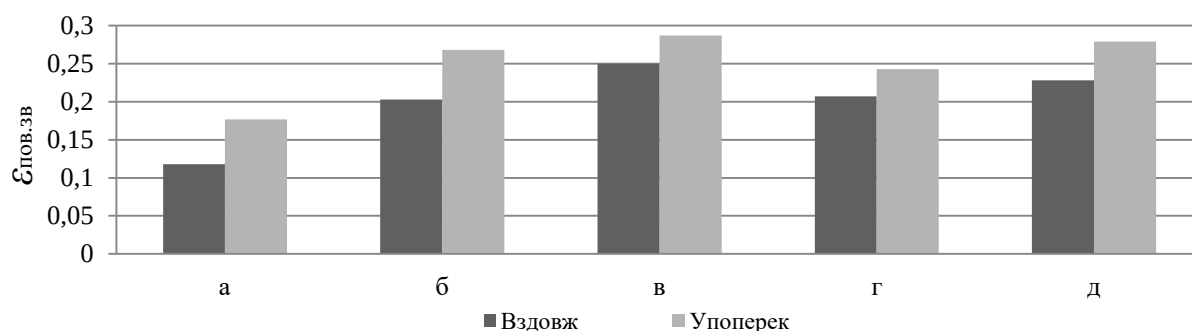


Рис. 1. Вплив нанорозмірного органосіліконового пом'якшувача Колосил на частку повільно-оборотної деформації у повній деформації: а) необроблений зразок; б, в) обробка методом вибирання, 2%, 4% препарату відповідно; г, д) обробка методом плюсування, 20 г/л, 40 г/л препарату відповідно

Аналізуючи отримані дані, важливо відзначити, що еластична (повільно-оборотна) деформація виникає внаслідок того, що під дією зовнішніх сил відбувається зміна макромолекул полімерів, що становлять волокна. Еластична деформація сильно залежить від умов, які впливають на міжмолекулярну взаємодію макромолекул полімерів у волокні. Тобто, еластична деформація, що протікає в умовах зміненої міжмолекулярної взаємодії, після зняття сил в значній мірі виявляється зафіксованою. Проводячи обговорення наведених на рис.1 даних, слід звернути увагу на технологію надання завершального оброблення трикотажному полотну. Якщо обробка текстилю за традиційною технологією передбачає проникання хімічних сполук (препаратів) в його структуру, утворену волокнами (нитками), то нанотехнологічний вплив не зачіпає цієї макроструктури. Принципово нові властивості наноматеріалів забезпечуються на мікро- (але не макро-) рівні. Беручи до уваги деякий ступінь умовності в розподілі деформації на складові частини, можна вважати, що висловлене раніше в літературних даних твердження про вплив нанорозмірних препаратів на мікро рівні отримало експериментальне підтвердження.

Пластична (залишкова, необоротна) деформація - результат незворотного зміщення макромолекул один щодо одного на досить великі відстані. У результаті порушуються старі

сили взаємодії і на їх місці виникають нові. Пластична деформація може бути наслідком можливого розриву окремих макромолекул під дією прикладеного навантаження. У пряжі причиною пластичної деформації є також необоротне зміщення окремих ділянок і цілих волокон. Пластична деформація виникає поступово під дією навантаження і після його зняття залишається у волокнах та нитках. Як вплив, який відіграє певну роль у формуванні залишкової деформації, можна відзначити тільки вплив нанорозмірного органосиліконового пом'якшувача Колосил. При розтягуванні трикотажного полотна вздовж петельних стовпчиків частка залишкової складової частини деформації для необробленого трикотажного полотна складає 0,147, а для обробленого препаратом Колосил в концентрації 4% зменшується до 0,050. Але аналізуючи вплив нанорозмірного органосиліконового пом'якшувача Колосил на показники залишкової деформації слід зауважити, що при розтягуванні вздовж, величини залишкових деформацій досить малі і не перевищують 3-4%, тому ними можна знехтувати і не враховувати при побудові конструкції.

Зміна лінійних розмірів трикотажного полотна після мокрих обробок є одним з основних показників, який характеризує його технологічність і якість. Дослідження показника проводили як вздовж петельних стовпчиків – вздовж полотна (по довжині), так і вздовж петельних рядів – уперек полотна (по ширині).

Результати визначення зміни лінійних розмірів зразків після волого-теплових обробок представлені у табл.2.

Таблиця 2

Вплив нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів на зміну лінійних розмірів зразків трикотажного полотна

Зміна розмірів, %							
Обробка методом вибирання							
	Необроблений зразок	Колософт П, %		Колосил макро, %		Колосил, %	
		2	4	2	4	2	4
по довжині	-1,4	-1,1	-0,8	1,9	0,3	1,3	1,1
по ширині	-4	-2,0	-0,5	2,0	3,0	0,5	1,2
Обробка методом плюсування							
	Необроблений зразок	Колософт П, г/л		Колосил макро, г/л		Колосил, г/л	
		20	40	20	40	20	40
по довжині	-1,4	-1,1	-2,2	2	3,3	0,8	2
по ширині	-4	-2,0	-3,0	3,3	3,5	2,5	3,5

При вивченні фізико-механічних властивостей традиційних трикотажних полотен прийшли до висновку, що усадка і притяжка трикотажу при мокрих обробках відбуваються в основному внаслідок зміни параметрів петельної структури, а зміна в структурі ниток і волокон в результаті набухання має другорядне значення. Але, хоча методи протизсідальної обробки застосовуються вже десятиліття, до теперішнього часу немає достатньої ясності в питанні про те, яким чином обробка хімічними препаратами надає стійкості лінійних розмірів текстильним матеріалам після волого-теплової обробки. Аналіз даних, що наведено у табл.2, свідчить, що в цілому, пом'якшувачі позитивно впливають на стабільність лінійних

розмірів трикотажного полотна. Найкращі значення стабільності розмірів показав зразок, оброблений силіконовим пом'якшувачем Колосил методом вибирання (4% пом'якшувача від маси обробленого матеріалу). Результати виконаного дослідження свідчать, що у випадку застосування нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів для завершального оброблення трикотажних полотен механізм зміни лінійних розмірів трикотажного полотна вимагає додаткового дослідження. Насамперед, привертає увагу те, що при обробці трикотажного полотна пом'якшувачами усадка зникає, а з'являється невелика притяжка. Поява принципово нових властивостей після обробки трикотажного полотна нанорозмірними органосиліконовими пом'якшувачами дає підстави вважати, що йдуть зміни в структурі волокон на мікрорівні, і вони мають першорядне значення для формування властивостей трикотажного полотна.

Аналіз можливостей оптимізації технологічного процесу виготовлення швейних виробів в системі «машина - виробниче середовище» для пошуку шляхів мінімізації трудомісткості і підвищення продуктивності і рентабельності виробництва, свідчить, що слід звернути увагу на підвищення пошивних властивостей текстильних матеріалів.

Експериментальні дані впливу пом'якшувальної обробки трикотажного полотна на продуктивність швейної машини при шитті зразків, які оброблено методом вибирання і плюсування наведено на рис.2 та рис.3 відповідно.

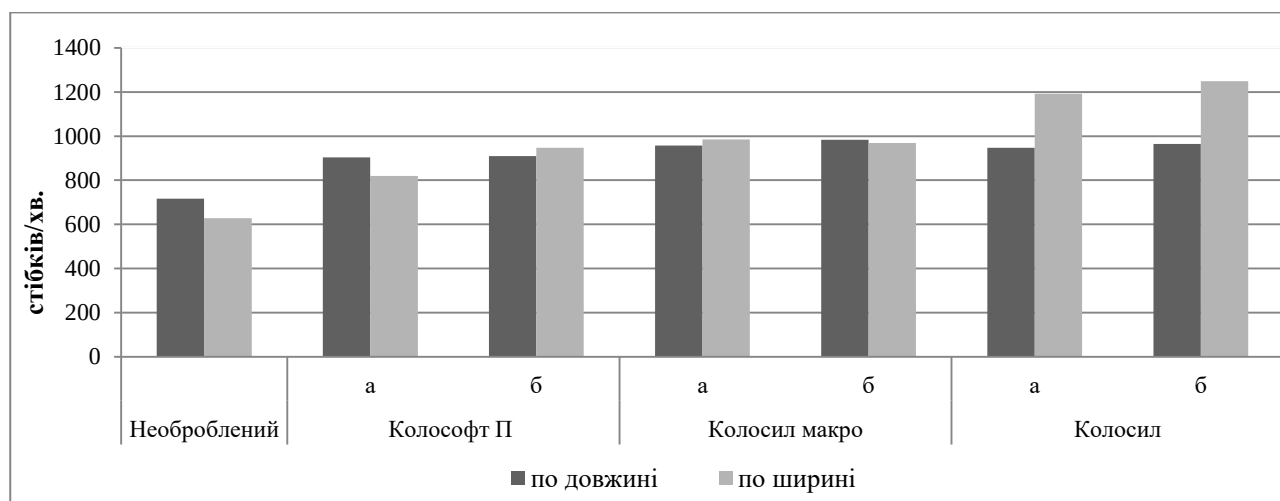


Рис. 2. Вплив пом'якшувальної обробки трикотажного полотна на продуктивність швейної машини (обробка методом вибирання): а, б) 2%, 4% препарата відповідно

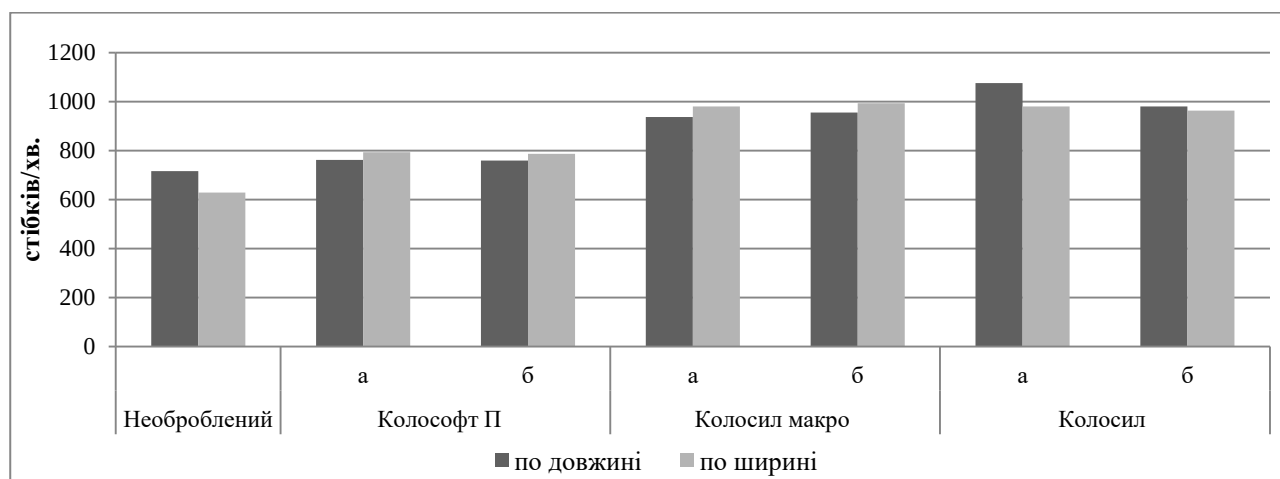


Рис.3. Вплив пом'якшувальної обробки трикотажного полотна на продуктивність швейної машини (обробка методом плюсування): а, б) 20 г/л, 40 г/л препарата відповідно

Виходячи з отриманих даних, можна зробити висновок, що завершальну обробку трикотажного полотна інноваційними нанорозмірними органосиліконовими пом'якшувачами можна вважати фактором зниження технологічної трудомісткості швейних виробів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Показана можливість поліпшення технологічних характеристик трикотажного полотна шляхом застосування інноваційного завершального оброблення з використанням нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів.

Визначено вплив нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів на показники технологічних властивостей трикотажного полотна: деформаційні властивості, стабільність лінійних розмірів, продуктивність швейної машини.

Результати експериментальних досліджень дозволили виявити, що найкращих показників технологічних властивостей трикотажного полотна можна досягти при застосуванні нанорозмірного органосиліконового пом'якшувача Колосил, який використовували за методом вибирання в концентрації 4% від оброблюваного матеріалу.

Представлені результати досліджень - початкова ланка визначення особливостей впливу інноваційних препаратів для завершального оброблення на властивості трикотажних полотен. Результати виконаного дослідження свідчать, що у випадку застосування нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів для завершального оброблення трикотажних полотен механізм зміни мікроструктури волокна вимагає подальшого дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для надання нових властивостей текстильним матеріалам шляхом застосування нанотехнологій у їх виробництві.

Література

1. Кулик А.А. Розробка трикотажу підвищеної міцності та дослідження його механічних характеристик / А.А. Кулик, С.Ю. Боброва, Л.Є. Галавська // Міжнародний науковий журнал «Освіта і наука». – 2019, 1(26). – С.40-47.
2. Ramakrishnan G, Comfort properties of bamboo/cotton blended knitted fabrics produced from rotor spun yarns / G. Ramakrishnan, P. Umapathy, C. Prakash // The Journal of The Textile Institute. - 2015, 106, 12. – P. 1371- 1376.
3. Єліна Т. В. Покращення споживчих властивостей трикотажного одягу за рахунок використання бамбукової сировини [Електронний ресурс] / Т. В. Єліна, Т. А. Дзикович, А. С. Шаталюк // Технології та дизайн. - 2017. - № 4 (25). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_4_8/
4. Галавська Л. Є. Дослідження вологопоглинаючих властивостей кулірного трикотажу з еко-сировини [Електронний ресурс] / Л. Є. Галавська, Н. О. Дмитрієва // Технології та дизайн. - 2015. - № 3 (16). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2015_3_3
5. Єліна Т. В. Зміна лінійних розмірів трикотажу з вмістом бамбукової нитки після вологих обробок [Текст] / Т. В. Єліна, Т. А. Дзикович, В. О. Герасименко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. - 2014. - № 4 (78). - С. 178-182.
6. Дзикович Т. А. Дослідження усадки трикотажу кулірних переплетень з вмістом бамбукової пряжі / Т. А. Дзикович, Ю. С. Некрасова, Ю. О. Мельничук // Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion / за заг. ред. Л. І. Зубкової : (31 жовтня 2019 р., м. Київ). - Київ : КНУТД, 2019. - С. 227-230.
7. Боброва С.Ю. Деформаційні властивості трикотажу для захисту рук від механічних ушкоджень / С.Ю. Боброва, Д.О. Шипко, Л.Є. Галавська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019, №1(269). – С.96-99. - DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-96-99.
8. Кизимчук О. П. Механічні властивості основов'язаного трикотажу з високорозтяжним повздовжнім утком / О.П. Кизимчук, М. С. Яременко // Вісник КНУТД. - 2012. - №6, С.127-133. ISSN 1813-6796.

References

1. Kulyk A.A., Bobrova S.Yu., Halavska L.Ye. (2019) Rozrobka trykotazhu pidvyshchenoi mitsnosti ta doslidzhennia yoho mekhanichnykh kharakterystyk [Development of high-strength knitwear and research of its mechanical characteristics]. *International scientific journal "Education and Science*, № 1(26), 40-47 [In Ukrainian].
2. G. Ramakrishnan, P. Umapathy, C. Prakash (2015) Comfort properties of bamboo/cotton blended knitted fabrics produced from rotor spun yarns. *The Journal of The Textile Institute*. - 106, 12, 1371- 1376.
3. Yelina T. V., Dzykovych T. A., Shataliuk A. S. (2017) Pokrashchennia spozhyvchykh vlastyvostei trykotazhnogo odiahu za rakhunok vykorystannia bambukovoi syrovyny [Improving the consumer properties of knitted clothing through the use of bamboo raw materials] *Technology and design*, №4(25) http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_4_8/ [In Ukrainian].
4. Halavska L. Ye., Dmytriieva N.O. (2015) Doslidzhennia voloho-pohlynaiuchykh vlastyvostei kulirnoho trykotazhu z eko-syrovyny [Research of moisture-absorbing properties of cool jersey from eco-raw materials] *Technology and design*, № 3 (16) http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2015_3_3 [In Ukrainian].
5. Yelina T. V., Dzykovych T. A., Herasymenko V. O. (2014) Zmina liniinykh rozmiriv trykotazhu z vmistom bambukovoi nytky pislia volohykh obrobok [Changing the linear dimensions of knitwear containing bamboo thread after wet treatments]. *Herald of Kyiv National University of Technology and Design*, № 4 (78), 178-182 [In Ukrainian].
6. Dzykovych T. A., Nekrasova Yu. S., Melnychuk Yu. O. (2019) Doslidzhennia usadky trykotazhu kulirnykh perepleten z vmistom bambukovoi priazhi [Study of shrinkage of knitted fabrics of cool weaves containing bamboo yarn]. *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference of Textile and Fashion Technologies KyivTex&Fashion*, version L. I. Zubkovo, P. 227-230 [In Ukrainian].
7. Bobrova S.Yu., Shypko D.O., Halavska L.Ye. (2019) Deformatsiini vlastyvosti trykotazhu dlia zakhystu ruk vid mekhanichnykh ushkodzen [Deformation properties of knitwear to protect hands from mechanical damage] *Herald of Khmelnytsky National University*, №1(269), P.96-99. DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-96-99. [In Ukrainian].
8. Kyzymchuk O. P., Yaremenko M. S. (2012) Mekhanichni vlastyvosti osnovov'iazanoho trykotazhu z vysokoroztyazhnym povzdovzhnim utokom [Mechanical properties of warp knitwear with high-

9. Roshan P. Functional Finishes for Textiles: Improving Comfort, Performance and Protection / Roshan Paul // Elsevier. - 2014.
10. Куценко Т. В. Використання новітніх технологій у виготовленні текстильних матеріалів із заданими властивостями / Т. В. Куценко // Наукові записки [Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка] - 2017. - Вип. 12(2). - С. 179-184. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmfm_2017_12\(2\)_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmfm_2017_12(2)_30).
11. [Gong A.](#) Effects of Softeners on Cotton Fabric Mechanical Properties / [A. Gong, RH](#) and [Bhatia](#) // 2 [Research Journal of Textile and Apparel](#). - 2009. Vol. 13 № 4. - P. 45-50. <https://doi.org/10.1108/RJTA-13-04-2009-B006>
12. Sadek R. Effect of fabric softener on properties of a single jersey knitted fabric made of cotton and spandex yarn/ R. Sadek // International Journal of Clothing Science and Technology. - 2012. - 24, 4. - P.251-272. <https://doi.org/10.1108/09556221211232847>.
13. Tondl, R. M. Sewing with Knit Fabrics. Extension Clothing Specialist. - 2006. - University of Nebraska.
14. Sand C. Fashionable Trends in Textile Finishing / C. Sand, R. Brückmann, R. Zyschka // Melliand International. - 2001. №7. - P.71-73.
15. Alaa A. Sewability of knitted fabrics made from cellulosic fibres / A. Alaa, E. Ashraf // Indian Textile Journal. - 2013. №123, 6. - P.65.
16. Sadek R. Effect of fabric softener on properties of a single jersey knitted fabric made of cotton and spandex yarn / R. Sadek // International Journal of Clothing Science and Technolog. - 2012. №24, 4. - P.251-270.
17. Megeid The influence of stitch length of weft knitted fabrics on the sewability / Megeid, Z.M.A., Al-bakry, M. Ezzat // Journal of American Science. - 2011. №7(8). P.610-617.
18. Гібелінда О.А. Вплив авіважної обробки трикотажних полотен на пошивні властивості / О.А. Гібелінда, М.О. Рожкова, С.О. Поліщук // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молодь - науці і виробництву - 2018: Інноваційні технології легкої промисловості» - 2018. - С.53-54.
19. Coyle Shirley Smart Nanotextiles: A Review of Materials and Applications. / Coyle Shirley, Wu Yanzhe, Lau Kim, de rossi Danilo, Wallace Gordon, Diamond Dermot // MRS Bulletin. - 2007. stretch longitudinal weft] // *Herald of KNUVD*, №6, 127-133. ISSN 1813-6796.
9. Roshan Paul (2014) Functional Finishes for Textiles: Improving Comfort, Performance and Protection. *Elsevier*.
10. Kutsenko T. V. (2017) Vykorystannia novitnikh tekhnolohii u vyhotovlenni tekstylnykh materialiv iz zadanyimi vlastyvostyamy [The use of the latest technologies in the manufacture of textile materials with specified properties]. *Scientific notes* [Kirovograd State Pedagogical University named after Vladimir Vynnychenko], Vol. 12(2)1 79-184. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmfm_2017_12\(2\)_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmfm_2017_12(2)_30) [In Ukrainian].
11. [Gong A.](#), [RH](#) and [Bhatia](#) (2009) Effects of Softeners on Cotton Fabric Mechanical Properties. 2 [Research Journal of Textile and Apparel](#), Vol. 13 № 4, P.45-50, <https://doi.org/10.1108/RJTA-13-04-2009-B006>
12. Sadek R. (2012) Effect of fabric softener on properties of a single jersey knitted fabric made of cotton and spandex yarn. *International Journal of Clothing Science and Technology*. Vol.4 (24), P. 251-272. <https://doi.org/10.1108/09556221211232847>
13. Tondl R. M. (2006) Sewing with Knit Fabrics. Extension Clothing Specialist *University of Nebraska*.
14. Sand C., Brückmann R., Zyschka R. (2001) Fashionable Trends in Textile Finishing *Melliand International*, №7. - P.71-73.
15. Alaa A., Ashraf E (2013) Sewability of knitted fabrics made from cellulosic fibres. *Indian Textile Journal*, №123, 6, P.65.
16. Sadek R. (2012) Effect of fabric softener on properties of a single jersey knitted fabric made of cotton and spandex yarn. *International Journal of Clothing Science and Technolog*. №24, 4, 251-270.
17. Megeid, Z.M.A., Al-bakry, M. Ezzat (2011) The influence of stitch length of weft knitted fabrics on the sewability. *Journal of American Science*, №7(8), P.610-617.
18. Hibelinda O.A., Rozhkova M.O., Polischuk S.O. (2018). Vplyv avivazhnoi obrobky trykotazhnykh poloten na poshyvni vlastyvosti [Influence of careful processing of knitted fabrics on sewing properties]. *Youth - Science and Production - 2018: Innovative Technologies of Light Industry: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists* (pp. 53-54). Kherson: Khersons'kyj natsional'nyj tekhnichnyj universitet [in Ukrainian].
19. Coyle, Shirley & Wu, Yanzhe & Lau, Kim & de rossi, Danilo & Wallace, Gordon & Diamond, Dermot.

- 32. 434-442. 10.1557/mrs2007.67.
20. Матвейцова Д.С. Нанотехнології у виробництві текстильних матеріалів / Д.С. Матвейцова, С.А. Карван, О.А. Параска // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017, №5 (217). – С.55-60.
21. Цебренько М.В. Властивості поліпропіленових мікрОВОЛОКОН, наповнених вуглецевими нанотрубками та композиціями з компатибізатором / М.В. Цебренько, В.Г. Резанова, М.Т. Картель, І.А. Мельник, Г.П. Приходько // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2013. – Т. 4. – № 3. – С. 305–313.
22. Мельник І.А. Поліпропіленові хірургічні мононитки з антимікробними властивостями / І.А. Мельник, В.Г. Резанова, М.В. Цебренько, Н.М. Резанова, А.О. Голтфрід, О.А. Вільцанюк // Вісник КНУТД. – 2013. – № 2. – С. 79–85.
23. Березненко М.П. Розробка нового асортименту синтетичних ниток, модифікованих нанопрепаратами / М.П. Березненко, В.І. Власенко, В.І. Вісленко, Н.О. Курлова // Вісник ХНУ. – 2011. – №3. – С. 104–108.
24. Bereznenko S. A novel equipment for making nanocomposites for investigating the antimicrobial properties of nanotextiles. International / S. Bereznenko, N. Bereznenko, M. Skyba, D.Yakymchuk, T. Artemenko, D. Prybeha, O. Synyuk, Eu.Kalinsky // Journal of Clothing Science and Technology. - 10.1108/IJCST-07-2019-0107.
25. Koroleva M.Yu. Nanoemulsions: the properties, methods of preparation and promising applications / M.Yu. Koroleva, E.V. Yurtov // RUSS CHEM REV. – 2012. - 81 (1). - P.21–43. DOI: https://doi.org/10.1070/RC2012_v081n01ABEH004219
26. Труєвцев А.В. Прикладна механіка трикотажу: навч. посібник. // СПб: СПГУТД. – 2001. - С.96
27. Kurbak A. Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures Part I: A Geometrical Model for Widthwise Curlings of Plain Knitted Fabrics / A. Kurbak, O. Ekmen // Textile Research Journal. - 2008. Vol. 78 (3). P. 198 – 208.
28. Kayacan O. Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures Part IV: A Geometrical Modeling of Miss Stitches / O. Kayacan, A. Kurbak // Textile Research Journal. - 2008. Vol. 78 (8). - P. 659 – 663.
29. Kayacan O. Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures Part V: A (2007). Smart Nanotextiles: A Review of Materials and Applications. MRS Bulletin. 32. 434-442. 10.1557/mrs2007.67.
20. Matveitsova D.S. & Karvan S.A. & Paraska O.A. (2017) Nanotekhnolohii u vyrobnytstvi tekstylnykh materialiv [Nanotechnologies in the production of textile materials]. Herald of Khmelnytsky National University, №5 (217), 55-60 [In Ukrainian].
21. Tsebrenko M.V. & Rezanova V.H. & Kartel M.T. & Melnyk I.A. & Prykhodko H.P. (2013) Vlastyvosti polipropilenovykh mikrovolokon, napovnenykh vuhletsevymy nanotrubkamy ta kompozytsiamy z kompatybizatorom [Properties of polypropylene microfibers filled with carbon nanotubes and compositions with a compatibilizer] Chemistry, physics and surface technology Vol.4, № 3, P.305–313 [In Ukrainian].
22. Melnyk I.A. & Melnyk I.A. & Tsebrenko M.V. & Rezanova V.H & Rezanova N.M. & Holtfrid A.O. & Viltaniuk O.A. (2013) Polipropilenovi khirurhichni mononytky z antymikrobnymy vlastyvostiamy [Polypropylene surgical monofilaments with antimicrobial properties] Herald of KNUTD, № 2, 79–85 [In Ukrainian].
23. Bereznenko M.P. & Vlasenko V.I. & Vislenko V.I. & Kurlova N.O. (2011) Rozrobka novoho asortymentu syntetychnykh nytok, modyfikovanykh nanopreparatamy [Development of a new range of synthetic threads modified by nanopreparations] Herald of Khmelnytsky National University, №3, 104–108 [In Ukrainian].
24. Bereznenko Sergey & Bereznenko, Natalia & Skyba, Mykola & Yakymchuk, Dmytro & Artemenko, Tetiana & Prybeha, Dmytro & Synyuk, Oleg & Kalinsky, Eugen. (2020). A novel equipment for making nanocomposites for investigating the antimicrobial properties of nanotextiles. International Journal of Clothing Science and Technology. ahead-of-print. 10.1108/IJCST-07-2019-0107.
25. Koroleva M.Yu. & Yurtov E.V. (2012) Nanoemulsions: the properties, methods of preparation and promising applications. RUSS CHEM REV. 81 (1), P.21–43. DOI: <https://doi.org/10.1070 /RC2012v081 n01ABEH004219>
26. A.V Truyevcev (2001) Prikladna mehanika trikotazhu: navch. posibnik. // SPb: SPGUTD, 96.
27. A.Kurbak, O.Ekmen (2008) Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures Part I: A Geometrical Model for Widthwise Curlings of Plain Knitted Fabrics. Textile Research Journal, Vol. 78 (3),198-208.
28. O. Kayacan, A. Kurbak (2008) Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures

Geometrical Modeling of Tuck Stitches / O. Kayacan , A.Kurbak // Textile Research Journal. - 2008. Vol. 78(7). - P.577 – 582.

30. Kurbak A. Creation of a Geometrical Model for Milano Rib Fabric / A.Kurbak , G.Amreeva // Textile Research Journal. - 2006. Vol. 76 (11). - P. 847 – 852.

31. Gabriel Cirio Efficient Simulation of Knitted Cloth Using Persistent / Gabriel Cirio, Jorge Lopez-Moreno, Miguel A. // OtaduySCA '15: Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH. Eurographics Symposium on Computer Animation August 2015 P. 55–61 <https://doi.org/10.1145/2786784.2786801>

Part IV: A Geometrical Modeling of Miss Stitches. *Textile Research Journal*. Vol. 78 (8), 659 – 663

29. O. Kayacan , A.Kurbak (2008) Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures Part V: A Geometrical Modeling of Tuck Stitches. *Textile Research Journal*. Vol. 78(7), 577 – 582.

30. A.Kurbak , G.Amreeva(2006) Creation of a Geometrical Model for Milano Rib Fabric. *Textile Research Journal*. Vol. 76 (11), 847 – 852.

31. Gabriel Cirio, Jorge Lopez-Moreno, Miguel A.(2015) Efficient Simulation of Knitted Cloth Using Persistent OtaduySCA '15: Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH. Eurographics Symposium on Computer Animation. 55–61 <https://doi.org/10.1145/2786784.2786801>

SUMSKA O.

ORCID: 0000-0003-1606-6103

PhD, Associate Professor

Kherson National Technical University

HIBELINDA O.

student

Kherson National Technical University

FESHCHUK Yu.

ORCID: 0000-0003-0510-6325

Kherson National Technical University

PANCHENKO N.

Kherson National Technical University

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОРГАНОСИЛИКОНОВЫХ МЯГЧИТЕЛЕЙ

СУМСКАЯ О.П., ФЕЩУК Ю.А., ГИБЕЛИНДА Е.А., ПАНЧЕНКО Н.В.

Херсонский национальный технический университет

Цель. Определить влияние наноразмерных органосиликоновых мягчителей на технологические характеристики трикотажного полотна и оценить возможность их улучшения путем применения инновационной заключительной отделки.

Методика. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на основных положениях текстильного материаловедения. При экспериментальных исследованиях использованы стандартизованные методы и методики, воспроизводящие в лабораторных условиях придание отделки «мягчение» трикотажным полотнам. Технологический процесс шитья был выполнен на промышленной швейной машине Juki DLL-8100e. Частоту стежков строчки определяли регистрационным методом.

Результаты. Установлено, что применение наноразмерных органосиликоновых мягчителей улучшает технологические свойства трикотажного полотна. Обнаружено, что наноразмерный органосиликоновый мягчитель Колосил, который использовали методом выбора в концентрации 4% от обрабатываемого материала, оказывает существенное влияние на полную деформацию и повышает долю медленно-обратимой составляющей деформации. Показано, что применение мягчителей положительно влияет на стабильность линейных размеров трикотажного полотна. Доказано, что заключительную отделку трикотажного полотна инновационными наноразмерными органосиликоновыми мягчителями можно считать фактором снижения технологической трудоемкости швейных изделий.

Научная новизна. Научная гипотеза получила экспериментальное подтверждение в применении наноразмерных органосиликоновых мягчителей для улучшения технологических характеристик трикотажного полотна. Показано, что обработка наноразмерными мягчителями

вызывает изменения в структуре волокон на микроуровне, которые имеют первостепенное значение для формирования технологических свойств трикотажного полотна.

Практическая значимость. Результаты исследований могут использоваться в разработке новых материалов с улучшенными свойствами, при конструировании деталей одежды и пошиве изделий из трикотажного полотна.

Ключевые слова: деформационные свойства, стабильность линейных размеров, производительность швейной машины, нанотекстиль.

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF KNITTED FABRIC BY USING NANOSIZED ORGANOSILICONE SOFTENERS

SUMSKA O., FESHCHUK Yu., HIBELINDA O., PANCHENKO N.

Kherson National Technical University

Purpose. To determine the effect of nanosized organosilicon softeners on the indices of the technological properties of a knitted fabric, to assess the possibility of their improvement through the use of innovative finishing processing.

Methodology. Theoretical and experimental studies are based on the basic principles of textile materials science. In experimental studies, standardized methods and techniques were used, which are reflected in the laboratory by providing softening treatment for knitted fabrics. The sewing process was performed on a Juki DLL-8100e industrial sewing machine. The stitch frequency of the stitches was determined by the registration method.

Finding. It is determined that the use of nanosized organosilicon softeners significantly affects the performance of the technological properties of a knitted fabric. It was found that the Kolosil nanosized organosilicon softener, which was used by the selection method at a concentration of 4% of the processed material, has a maximum effect on the total deformation and increases the proportion of the slowly inverse deformation component. It is shown that the use of softeners has a positive effect on the stability of the linear dimensions of a knitted fabric. It is proved that the final processing of knitted fabric with innovative nanosized organosilicon softeners can be considered a factor in reducing the technological complexity of garments.

Originality. The scientific hypothesis has been experimentally confirmed in the use of nanosized organosilicon softeners to improve the indicators of the technological properties of a knitted fabric. It is shown that treatment with nanoscale softeners causes changes in the structure of fibers at the micro level, which are of paramount importance for the formation of technological properties of a knitted fabric.

Practical value. The research results can be used in the development of new materials with improved properties, in the design of clothing parts and in sewing knitted fabrics.

Keywords: deformation properties, stability of linear dimensions, productivity of a sewing machine, nanotextile.

УДК 687.846

БУСЬКО А. П., АРАБУЛІ А. Т.

Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДУБЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ОДЯГУ ІЗ ШТУЧНОГО ХУТРА

Мета. Аналіз особливостей структури штучного хутра різного сировинного складу для покращення формостабільності виробів та збільшення процесу експлуатації. Визначення технологічних параметрів процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра при яких досягається унормований рівень якості виконання операції дублювання. Виконання експериментальних досліджень для визначення фізичних та механічних показників штучного хутра та пакетів на їх основі.

Методика. В роботі використовувалися загальновідомі методики визначення жорсткості щодо згинання, повітропроникності та гідрофобності штучного хутра. Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на основних положеннях текстильного матеріалознавства. Для визначення стану питання і постановки завдання застосовано системний аналіз та узагальнення. Здійснено планування експерименту процесу дублювання деталей із штучного хутра та отримані двофакторні математичні моделі, які є адекватними досліджуваному процесу.

Результати. Проаналізовано вплив процесу дублювання на штучне хутро різного сировинного складу. Визначено значення показників фізичних та механічних властивостей сучасного штучного хутра. На основі двофакторних математичних моделей надані рекомендації щодо вибору технологічних параметрів дублювання деталей одягу із штучного хутра.

Наукова новизна. Встановлено закономірності процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра з клейовим прокладковим матеріалом в умовах статичного навантаження.

Практична значимість. Визначені значення показників фізичних та механічних властивостей сучасного штучного хутра. Отримані наукові результати дозволяють на етапі проектування раціонально підбирати штучне хутро при виготовленні верхнього одягу, а визначені раціональні технологічні параметри виконання процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра дозволяють забезпечити унормований рівень якості виконання операції дублювання при мінімізації енергетичних втрат роботи обладнання.

Ключові слова: штучне хутро, дублювання, жорсткість щодо згинання, повітропроникність, гідрофобність.

Вступ. Сучасна хутряна мода стрімко розвивається [1]. Як і у попередні роки дизайнери не залишили без своєї уваги сучасні моделі одягу із штучного хутра. Поряд із одягом із натурального хутра актуальним залишається і – одяг із штучного хутра. Ця тенденція не просто зайняла свою нішу, але й надійно закріпилася на світових модних подіумах. Сучасне штучне хутро за якістю матеріалу практично не відрізняється від натурального хутра, а можливостей у фарбуванні та дизайні воно має набагато більше. За даними [2] перевагами одягу із штучного хутра та матеріалу є:

- прихильники руху «Greenpeace» активно підтримують моду на речі, які не вимагають вбивства тварин. Якщо споживач підтримує прихильників цього руху, тоді він є потенційним покупцем одягу із штучного хутра;

- в умовах економічної кризи не кожний споживач може дозволити собі шубу з натурального хутра;

- сучасні технології виготовлення хімічних волокон значно розвилися, тому некваліфікована людина одразу не зможе відрізнити штучне хутро від натурального;
- вага штучного хутра в декілька раз менша у порівнянні із натуральним хутром;
- за виробами із штучного хутра легше доглядати та зберігати;
- штучне хутро може вироблятися заданої густоти і висоти ворсу і мати однакові механічні властивості по всій площі, тоді як властивості натурального хутра визначаються видом і топографією шкірки;
- при виготовленні виробів із натурального хутра виробники використовують різні хімічні реагенти (аміак, хром та формальдегід) з метою захисту від біологічного розкладання.

Поряд з цим є і недоліки:

- штучне хутро у порівнянні із натуральним менше зберігає тепло та є більш повітропроникним, а у процесі експлуатації ворс згодом пілінгується;
- життєвий цикл виробу із штучного хутра значно менший ніж у виробів з натурального хутра.
- утилізація виробів із штучного хутра сьогодні майже подібна таким виробам, як пластик, вони не піддаються біологічному розкладанню.

Штучне хутро легше натурального, досить зносостійке, але має підвищену повітропроникність і володіє меншими теплозахисними властивостями, які залежать від способу отримання. Хутро на трикотажній основі завдяки об'ємності має нижчу теплопровідність в порівнянні з тканим. Накладне штучне хутро володіє більш низькими теплозахисними властивостями. Штучне хутро стійке до дії світла і вологи.

Синтетичні волокна, призначені для виготовлення ворсу штучного хутра, повинні володіти високою пружністю, малою питомою вагою, об'ємністю, не повинні бути крихкими і ламкими [3]. Але, не зважаючи на недоліки, які притаманні штучному хутру, вироби з них сьогодні повторюють тенденції виробів із натурального хутра [4].

При виготовленні швейних виробів, з метою надання їм яскравості та оригінальності, використовують деталі одягу із штучного хутра, а саме кокетки пілочки та спинки, коміри, манжети тощо, а в процесі експлуатації одяг піддається впливу світла, погоди, вологи, різним деформаціям, які призводять до погіршення зовнішнього вигляду виробу [5], а згодом і втратою формостабільності виробу. З метою забезпечення формостабільності виробів з деталями одягу із штучного хутра та її підвищення в цілому на швейних підприємствах у технологічному процесі зазвичай використовують клейові прокладкові матеріали та виконують технологічну операцію дублювання деталей одягу.

Постановка завдання. Дослідження процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра виникла через тенденцію постійної зміни сировинної бази виготовлення штучного хутра за рахунок розширення асортименту синтетичних волокон і матеріалів [6] та відсутності значень показників фізичних та механічних властивостей штучного хутра, що впливають на формостабільність виробу. Відомо, що за способами отримання штучне хутро розрізняють на тканий основі, трикотажній основі, тканепрошивній основі та основі з приклеєним ворсом. При виготовленні швейних виробів із штучного хутра використовують різні клейові прокладкові матеріали з низькою температурою плавлення клейової крапки. На

сьогоднішній день швейні підприємства України мають у своєму розпорядженні широку гамму клейових прокладкових матеріалів, основна частка яких представлена закордонними фірмами – виробниками Kufner, Freudenberg, Hänsel, Hoff (ФРН), Lainiere de Picardie (Франція), Fiset (Нідерланди), Webb, Staflex Bonding LTD, Wilen (Англія), Хунгаротекс (Угорщина), Haus Gigli (Швейцарія), Camela (Польща) та ін.. Зважаючи на це, виникла необхідність у встановленні закономірності впливу різних факторів при дублюванні на рівень якості виконання цієї операції.

Аналіз показав [7], що з'єднання деталей з клейовими прокладковими матеріалами у швейно-трикотажних виробках здійснюють на пресах або з допомогою прасок до обробки виточок, кишень, рельєфів тощо. Тому метою роботи є встановлення значень показників жорсткості щодо згинання, повітропроникності, гідрофобності штучного хутра та пакетів на їх основі і визначення раціональних технологічних параметрів виконання операції дублювання деталей одягу із штучного хутра за рахунок використання статичних методів навантаження [8], при яких забезпечуються унормований рівень якості клейового з'єднання матеріалів.

Результати досліджень. Об'єктом дослідження є процес дублювання деталей одягу із штучного хутра, а предметом дослідження – штучне хутро та пакети на їх основі. Для проведення дослідження були обрані різні зразки штучного хутра (табл. 1), характеристики яких розрізняються за сировинним складом та структурними характеристиками, а в таблиці 2 представлена характеристика низькотемпературного клейового прокладкового матеріалу.

Таблиця 1

Структурні характеристики штучного хутра

Номер зразка	Фото зразка	Умовне позначення, країна виробник	Вміст складників сировинного складу, %		Поверхнева густина, (г/м ²)
			ворс	грунт	
1		9139/30 (Франція)	ПАН-60, Бавовна-40	Тканна основа, полотняне переплетення	450
2		C9144/690 (Китай)	ПА-80, Віс-20	Клеєва основа з додатковим утепленням (синтепоном)	550
3		9135 (Китай)	ПАН-50, ПЕ-50	Трикотажна основа	850

Таблиця 2

Структурні характеристики клейового прокладкового матеріалу

Фото зразка	Умове позначення	Вміст складників сировинного складу, %	Клейове нанесення	Поверхнева густина, г/м ²
	28254 (Польща)	ПЕ-100	крапкове	100

З метою покращення якості виготовлення деталей виробів з штучного хутра були визначені фізичні та механічні властивості хутра та пакетів на їх основі. Показники повітропроникності, жорсткості щодо згинання, гідрофобності штучного хутра визначалися із застосування загальновідомих методик. Повітропроникність штучного хутра та пакетів на їх основі визначалися на приладі АТЛ-2, а жорсткість щодо згинання – на приладі ПТ-2.

Для визначення гідрофобності використовувався скляний мірний стакан, секундомір, термометр та дистильовану воду. Суть методу полягає в вимірюванні часу протягом якого відбувається повне водозанурення ворсу елементарної проби [9].

В таблиці 3 представлено значення показників, що досліджувалися, до дублювання та після дублювання прокладковим клейовим матеріалом.

Таблиця 3

Результати дослідження показників фізичні та механічні властивості хутра та пакетів на їх основі

Найменування показника, одиниця вимірювання	Номер зразка	Середнє значення показника	
		До дублювання	Після дублювання
Повітропроникність, дм ³ /(м ² с)	1	245	241
	2	804	801
	3	936	867
Жорсткість при згинанні, основа (уток) або по пет. стовп. (вздовж петель стовп.), мкН×см ²	1	1839 (1358)	3108 (2513)
	2	21198 (37277)	31031(91648)
	3	78514 (10348)	87154 (39473)
Гідрофобність, (час намокання), с	1	2,11	2,48
	2	0,21	0,53
	3	27,10	30,70

Аналіз отриманих результатів дослідження (табл.3) показав, що для зразків відбулися зміни за показником повітропроникності, а саме для зразків 1 та 2 зміни – несуттєві, а для 3 зразка значення повітропроникності після дублювання прокладковим клейовим матеріалом знизилася близько в 1,08 рази. За показником жорсткості щодо згинання для зразків штучного хутра, спостерігається збільшення жорсткості по основі 1,11 – 1,69 та по утку 1,85

– 3,81 разів. Що стосується гідрофобності, то показники збільшилися: для 1 зразка – в 1,2 рази, для 2 – в 2,5 рази, а 3 – в 1,1 рази.

З метою забезпечення комфортності, формостійкості деталей одягу (комір, кокетка, манжети та ін.) отримані результати показників фізичних та механічних властивостей досліджень необхідно використовувати саме на етапі проектування швейного виробу.

На базі малого ательє проводилося дослідження процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра. В якості обладнання для дублювання була використана електропарова праска Rotondi EC-289 (вага 1,5 кг, потужність 1,1кВт, виробництва Італія) та прасувальний стіл, а засобом контролю температури в зоні дублювання – цифровий мультиметр DT-838 (похибка вимірювання температури складає $\pm 2^{\circ}\text{C}$ від 3°C до 150°C). Операція дублювання проводилася з використанням припрасовувальника, а температура нагрівання контролювалася в середині пакету.

Для оцінки якості процесу дублювання був використаний показник міцності при розшаруванні, який визначався після охолодження зразків на машині СРМ-1. Згідно рекомендацій [10] величина показника міцності при розшаруванні (P_p) має бути не менша 2 Н/см, що визначає унормований рівень якості виконання технологічної операції дублювання.

Для дослідження раціональних технологічних параметрів процесу дублювання було здійснено планування експерименту. Планування експерименту дає можливість скоротити до мінімуму кількість дослідів, формалізує дії дослідника та сприяє прийняттю найбільш обґрунтованих рішень. З метою визначення раціональних параметрів процесу дублювання та, враховуючи особливості кожного із методів планування експерименту, в роботі був застосований метод планування експерименту типу $N=2^k$ при $K=2$, який дозволяє зменшити обсяг експериментів [11,12].

В якості вхідних факторів були прийняті температура T_{en} (температура всередині пакету) в діапазоні $100-120^{\circ}\text{C}$ та час дублювання t , значення якого орієнтовано складає 5–15с. Час дублювання знаходиться в діапазоні часу рекомендованого для досліджуваного клейового прокладкового матеріалу. Всі інші показники процесу дублювання були постійними. Вихідним показником якості дублювання приймалася міцність при розшаруванні P_p . Планування експерименту випробувань на розшарування для пакету зразок 1 + арт. 28254 представлено в таблиці 4. За такою матрицею були здійснені дослідження і для інших пакетів.

Таблиця 4

Матриця планування експерименту для пакету: зразок 1+ арт.28254

	Температура всередині пакету $T_{en}, ^{\circ}\text{C}$	Час дублювання t , с			
+	120	15			
0	110	10			
–	100	5			
Інтервал варіювання					
	10	5	Міцність при розшаруванні P_p , Н/см		
	X1	X2	Y1	Y2	Y3
1	+	+	2,9	2,8	2,9

Продовження таблиці 4

2	–	+	2,7	2,6	2,7
3	+	–	2,7	2,7	2,8
4	–	–	2,5	2,5	2,5
5	0	+	2,8	2,8	2,9
6	0	–	2,5	2,5	2,6
7	+	0	2,7	2,7	2,7
8	–	0	2,6	2,5	2,6

В кожному із варіантів досліджень застосовувалось по 3 зразки дубльованих пакетів, що дало можливість отримати більш точні значення показників на розшарування.

Математична обробка результатів експерименту здійснювалась з застосуванням програми «Star» [13]. Обробка результатів експерименту дозволила отримати двохфакторні математичні моделі, для пакетів зразок 1 + арт. 28254 (1), зразок 2 + арт. 28254 (2), зразок 3 + арт. 28254 (3), які являються адекватними досліджуваному процесу $\Phi_{розр} < \Phi_{табл.}$

$$Y = 2,625 + 0,122X_1 + 0,072X_2 + 0,060X_1^2 + 0,009X_2^2 \quad (1)$$

$$Y = 2,641 + 0,095X_1 + 0,150X_2 + 0,059X_1^2 - 0,108X_2^2 \quad (2)$$

$$Y = 2,566 + 0,167X_1 + 0,161X_2 + 0,0005X_1^2 - 0,117X_1X_2 - 0,083X_2^2 \quad (3)$$

Шляхом підстановки одного з факторів на стабілізованому нульовому рівні визначалася впливовість відповідного фактора на якість процесу дублювання. На прикладі рівняння (1) при підстановці $X_1=0$ та відповідно $X_2=0$ були отримані рівняння:

$$Y = 2,625 + 0,072X_2 + 0,009X_2^2 \quad (4)$$

$$Y = 2,625 + 0,122X_1 + 0,060X_1^2 \quad (5)$$

Шляхом підстановки у рівняння (4) і (5) значень факторів X_1 і X_2 +1, 0, -1 знайдені показники y_1 , y_2 . Дані представлені в таблиці 5. На підставі даних таблиці 5 були побудовані однофакторні графічні залежності $P_p=f(x_2)$; $P_p=f(x_1)$ (рис.1 (а,б)), на основі яких визначено вплив кожного із факторів на вихідну функцію.

Таблиця 5

Результати підстановки значень факторів у рівняння (4, 5)

Умовне позначення пакету	Показник якості, Y	$f=(x_i)$	$x_j=-1$	$x_j=0$	$x_j=1$
зразок 1 + арт. 28254	P_p	y_1 , при $x_2=0$	2,563	2,625	2,807
		y_2 , при $x_1=0$	2,562	2,625	2,706

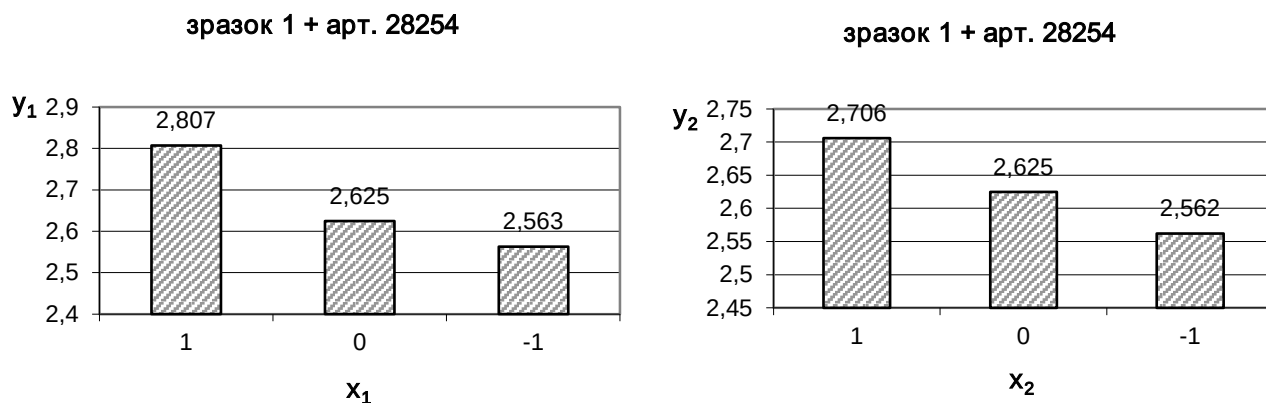


Рис. 1. Графічна відображення впливу факторів X_1 і X_2 на показник розшарування для пакету зразок 1 + арт. 28254

В даному випадку $\Delta y_1 = 0,244\text{Н}$ (рис 1, а) проти $\Delta y_2 = 0,144\text{Н}$ (рис.1, б), свідчить про перевагу впливу фактора температури на показники P_p ($\Delta y_1 > \Delta y_2$).

За такою ж послідовністю були проведені дослідження і для інших двох пакетів: зразок 2 + арт. 28254 та зразок 3 + арт. 28254. Результати представлені в табл.6.

Таблиця 6

Результати підстановки значень факторів у пакети зразок 2 + арт. 28254 та зразок 3 + арт. 28254

Умовне позначення пакету	Показник якості, Y	$f=(x_i)$	$x_j=-1$	$x_j=0$	$x_j=1$
зразок 2 + арт. 28254	P_p	y_1 , при $x_2=0$	2,605	2,641	2,795
		y_2 , при $x_1=0$	2,383	2,641	2,683
зразок 3 + арт. 28254	P_p	y_1 , при $x_2=0$	2,400	2,566	2,734
		y_2 , при $x_1=0$	2,322	2,566	2,644

Аналіз отриманих однофакторних моделей показав на перевагу впливу фактора температури всередині пакету на показник міцності при розшаруванні у в порівнянні з фактором часу дублювання. Що стосується результатів визначення раціональних параметрів виконання операції дублювання, то можна відмітити вже при $T_{en}=100^\circ\text{C}$ та $t=5\text{с}$ міцність при розшаруванні складає близько $2,5\text{Н/см}$. Тобто в умовах роботи сучасного малого ательє при тотальній економії енергетичних ресурсів рекомендованими технологічними параметрами процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра, що досліджується, є $T_{en}=100^\circ\text{C}$ та $t=5\text{с}$.

Висновки. Результати дослідження показників фізичних та механічних властивостей штучного хутра показали, на те, що при дублюванні деталей одягу (комір, кокетка, манжети та ін.) клейовими прокладковими матеріалами жорсткість щодо згинання та гідрофобність збільшуються, повітропроникність несуттєво зменшується. Такі зміни у значеннях показників необхідно враховувати на етапі проектування швейного виробу. Математичне моделювання процесу дублювання деталей одягу із штучного хутра дозволило встановити раціональні технологічні параметри $T_{en}=100^\circ\text{C}$ та $t=5\text{с}$ та визначити вплив фактора

температури всередині пакету на показник міцності на розшарування у порівнянні з фактором часу дублювання. Припущено, що час дублювання для предметів дослідження можна буде збільшити до 10с при $T_{en}=100^{\circ}\text{C}$ з метою підвищення міцності на розшарування, але у такому випадку доцільно було б провести випробування міцності на розшарування після 5 або 10 хімічних чищень з метою встановлення експлуатаційної надійності клейового з'єднання пакетів.

Література

1. McQuaid, P. Fur is everywhere this fall, but will fashionistas accept it?: Warming Trend P. McQuaid // The Los Angeles Times. (2004) Retrieved from: <http://articles.latimes.com/2004/aug/15/magazine/tm-fur33>. Date of access: 24.12.2016 [in USA].
2. Шуби зі штучного хутра: плюси та мінуси [Режим доступу]. URL: <http://ivona.bigmir.net/beauty/moda/441418-Shubi-z--shtuchnogo-hutra--pljusi-ta-minusi>.
3. Григорьев и др. Активность на поверхности. Поверхностно-активные вещества для меховой промышленности Григорьев Б.С., Давыдова Н.А., Щеголева Л.Л. Меха Мира. 2004, №3, с. 80-82.
4. Сайт журналу «Штучне хутро та кардинальна довжина: модні тренди хутра» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.roksolana.ua/>.
5. Кузьмичев В.Е. Теория и практика процессов склеивания деталей одежды. В.Е. Кузьмичев, Н.А. Герасимова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 256 с.
6. Савостицкий П.А. Материаловедение швейного производства – М.: Академия, 2009. -291с.
7. Крючкова Г.А. Технология швейно-трикотажных изделий – М.: Академия, 2009. -288с.
8. Гурович К. А. Основы материаловедения швейного производства. — 1-е изд. Учебник для НПО. — М.: Академия, 2013. — С. 155—158. — 208 с.
9. ГОСТ 26666.4-89. Мех искусственный трикотажный. Метод определения гидрофобности.
10. Бузов Б. А. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство) / Б. А. Бузов, Алыменкова Н.Д.; под ред. Б.А. Бузова. –3-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 448 с.

References

1. McQuaid, P. Fur is everywhere this fall, but will fashionistas accept it?: Warming Trend P. McQuaid. The Los Angeles Times. (2004) Retrieved from: <http://articles.latimes.com/2004/aug/15/magazine/tm-fur33>. Date of access: 24.12.2016 [in USA].
2. Shuby iz shtuchnogo xutra: plusy ta minusy [Faux fur coats: pros and cons]. [Rezhim dostupa]. URL: <http://ivona.bigmir.net/beauty/moda/441418-Shubi-z--shtuchnogo-hutra--pljusi-ta-minusi> [in Ukrainian].
3. Grigor'ev B.S., Davydova N.A., Shchegoleva L.L. (2004). Aktivnost' na poverhnosti. Poverhnostno-aktivnye veshchestva dlya mekhovoj promyshlennosti [Surface activity. Surfactants for the fur industry] *Mekha Mira–Fur of the World*, 3,80-82 [in Russian].
4. Sait zhurnala «Shtuchne khutro ta kardynalna dovzhyna: modni trendy khutra» [The site of the magazine "Faux fur and cardinal length: fashion trends of fur"]. Access mode: <http://www.roksolana.ua/> [in Ukrainian].
5. Kuz'michev V.E. & Gerasimova H.A.(2005). *Teoriya i praktika protsessov skleivaniya detaley odezhdy* [Theory and practice of gluing garment parts]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya» [in Russian].
6. Savostitskiy P.A. (2009) *Materialovedenie shveyного proizvodstva* [Materials science of garment production] Moscow: Akademiya [in Russian].
7. Kruchcova G.A. (2009) *Texnologiya shveino-tricotagnyx izdelii* [Sewing and knitwear technology] Moscow: Akademiya [in Russian].
8. Gurovich K. A. (2013) *Osnovy materialovedeniya shveyного proizvodstva*. [Basics of materials science of garment production] Moscow: Akademiya [in Russian].
9. GOST 26666.4-89. Mekh iskusstvennyy trikotazhnyy. Metod opredeleniya gidrofobnosti [State Standart 26666.4-89. Knitted faux fur. Method for determining hydrophobicity].
10. Buzov B.A. & Alymenkova N.D (2008) *Materialovedenie v proizvodstve izdeliy legkoy promyshlennosti (shveyное proizvodstvo)* [Materials science in the production of light industry products (clothing industry)]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya» [in Russian].
11. Tikhomirov V.B. (1974) *Planiroavnie i analiz eksperimenta*. [Planning and analysis of the experiment].

11. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974.–262с.
12. Бурмистенков О.П., Місяць В.П. Основи математичного моделювання технологічних процесів.- Метод. вказівки.- К.:2000.–81с.
13. Березненко Н.П., Кострицький В.В., Корзун В.В., Слободян В.О., Березненко С.М. Автоматизований обчислювальний комплекс для дослідження якості показників текстильних матеріалів//Якість і конкурентна здатність товарів широкого вжитку. Наукові праці учасників конференції країн СНД, Хмельницький.- 1993.- С.74-75.
- Moscow: Legkaya industriya [in Russian].
12. Burmystenkov O.P. & Misiats V.P.(2000). Osnovy matematychnoho modeliuвання tekhnolohichnykh protsesiv.[Fundamentals of mathematical modeling of technological processes.] Metod. vказivky. Kyiv [in Ukrainian].
13. Bereznenko N.P., Kostytskyi V.V., Korzun V.V., Slobodian V.O., Bereznenko S.M. (1993). Avtomatyzovanyi obchysliuvanyi kompleks dlia doslidzhennia yakosti pokaznykiv tekstylnykh materialiv [Automated computer system for research of quality of indicators of textile materials] Proceedings from quality and competitiveness of consumer goods. Naukovi pratsi uchasykiv konferentsii krain SND, Scientific works of the participants of the CIS conference (pp. 74-75). Khmelnytskyi [in Ukrainian]

ARABULI ARSENI

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-4998>
Department of technology and design of sewing products ,
Kyiv National University of Technologies and Design

BUSKO ANTONINA

a.busko@ukr.net
Kyiv National University of Technologies and Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДУБЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ОДЕЖДЫ ИЗ ИСКУССТВЕННОГО МЕХА

БУСЬКО А. П., АРАБУЛИ А. Т.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Анализ особенностей структуры искусственного меха разного сырьевого состава для улучшения формостабильности изделий и увеличения процесса их эксплуатации. Определение технологических параметров процесса дублирования деталей одежды из искусственного меха при которых достигается нормированный уровень качества выполнения операции дублирования. Выполнение экспериментальных исследований для определения физических и механических показателей искусственного меха, а также пакетов на их основе.

Методика. В работе использовались общеизвестные методики определения жесткости при изгибе, воздухопроницаемости и гидрофобности искусственного меха и пакетов на их основе. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на основных положениях текстильного материаловедения. Для определения состояния вопроса и постановки задачи были применены системный анализ и обобщение. Осуществлено планирование эксперимента процесса дублирования деталей из искусственного меха и на основании которого получены двухфакторные математические модели, которые являются адекватными исследуемому процессу.

Результаты. Проанализировано влияние процесса дублирования на искусственный мех различного сырьевого состава. Определены значения показателей физических и механических свойств современного искусственного меха. На основе двухфакторных математических моделей даны рекомендации по выбору технологических параметров дублирования деталей одежды из искусственного меха.

Научная новизна. Установлены закономерности процесса дублирования деталей одежды из искусственного меха с клеевым прокладочным материалом в условиях статической нагрузки.

Практическая значимость. Определены значения показателей физических и механических свойств современного искусственного меха. Полученные научные результаты позволяют на этапе проектирования, рационально подбирать искусственный мех при изготовлении верхней одежды, а

установленные рациональные технологические параметры выполнения процесса дублирования деталей одежды из искусственного меха позволяют обеспечить нормированный уровень качества выполнения операции дублирования при минимизации энергетических потерь работы оборудования.

Ключевые слова: искусственный мех, дублирование, жесткость при изгибе, воздухопроницаемость, гидрофобность.

RESEARCH OF THE PROCESS OF DUPLICATION OF DETAILS OF ARTIFICIAL FUR CLOTHES

BUSKO A.P., ARABULI A.T.

Kyiv National University of Technologies and Design

Goal. Analysis of the features of the structure of faux fur of different raw materials to improve the shape stability of products and increase the exploitation process. Determination of technological parameters of the process of duplication of garments made of faux fur at which a standardized level of quality of the duplication operation is duplicated. Performing experimental investigation to determine the physical and mechanical properties of artificial fur.

Methodology. The work used the well-known methods for determining the flexural stiffness, air permeability and hydrophobicity of artificial fur were used in the work. Theoretical and experimental investigation is based on the basic principles of textile materials science. Systematic analysis and generalization were used to determine the state of the question and set the task. The experiment of the process of duplication of faux fur parts was planned and two-factor mathematical models were obtained, which are adequate to the researched process.

Results. The influence of the duplication process on artificial fur of different raw material composition is analyzed. The values of indicators of physical and mechanical properties of modern faux fur are determined. On the basis of two-factor mathematical models, recommendations are given on the choice of technological parameters of duplication of garments made of faux fur.

Scientific novelty. The regularities of the process of duplicated of garment parts made of faux fur with adhesive gasket material under static loading are established.

Practical significance. The values of indicators of physical and mechanical properties of modern faux fur are determined. The obtained scientific results allow at the design stage to rationally select faux fur in the manufacture of outerwear, and certain rational technological parameters of the process of duplication of garments from faux fur allow to ensure a standardized level of quality of duplication operation while minimizing energy losses of equipment.

Key words: faux fur, duplication, bending stiffness, air permeability, hydrophobicity.

УДК 543.544.5.
068.7:615.212.3:
543.612

САЛІЙ О.О.¹, КУЗЬМІНА Г.І.¹, ФУКЛЕВА Л.А.², МАНАЦІЮК В.В.¹

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Запорізький державний медичний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАЛІДАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДИКИ КІЛЬКІСНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАЦЕТАМОЛУ ТА ЙОГО ОСНОВНОЇ ДОМІШКИ В РЕКТАЛЬНИХ СУПОЗИТОРІЯХ

Мета. Дослідження валідаційних характеристик методики кількісного визначення парацетамолу та його основної домішки 4-амінофенолу в ректальних супозиторіях методами спектрофотометрії (СФ) та вискоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ).

Методика. Спектрофотометричні вимірювання проводили на спектрофотометрі UV VIS Lambda 35 («Perkin Elmer», USA) в кюветах $l=1$ см. Використали рідинний хроматограф Waters 2695 з УФ-детектором Waters 2489, а також хроматографічну колонку Nucleosil C18 розміром $250 \times 4,6$ мм, заповнену октадецилсилільним сорбентом з розміром часток 10 мкм. При вивченні валідаційних характеристик застосовували реактиви: вода очищена, яку отримали з установки Milli Q, виробництва Millipore Corporation (Німеччина), натрію гідроксид Sigma-Aldrich, кат. № 06203, натрію І-бутансульфонат Sigma-Aldrich, кат. № 19022-10G-F; етанол 96%, метанол Sigma-Aldrich (чистота 99.9%), мурашина кислота Sigma-Aldrich, кат. № 33015.

Результати. Підтверджені валідаційні характеристики як специфічність, правильність, прецизійність. Встановлено повну прогнозовану невизначеність аналітичної методики кількісного вмісту та ліміти кількісного визначення основної домішки парацетамолу, при якому виконується співвідношення сигнал/шум - 10% від вихідної концентрації розчину порівняння (0,5 мкг/мл). Підтверджена лінійність для кількісного визначення вмісту парацетамолу в діапазоні від 80 до 120 % від номінального значення. Проведено статистичну обробку експериментальних даних, коефіцієнт кореляції лінійної залежності (r) між введеним і знайденими значеннями для кількісного вмісту парацетамолу, який визначали, становить $>0,990$, що свідчить про коректність методики.

Наукова новизна. Розроблено і валідовано методику кількісного вмісту парацетамолу та його основної домішки у супозиторіях. Методика кількісного вмісту парацетамолу в супозиторіях є значно простішою при виконанні рутинного контролю серії лікарського засобу та рентабельною порівняно з методом ВЕРХ.

Практична значимість. Отримані результати експерименту свідчать, що за дослідженими валідаційними характеристиками методика коректна та може бути відтворена в інших лабораторіях.

Ключові слова. Парацетамол, 4-амінофенол, ректальні супозиторії, валідаційні характеристики, кількісне визначення, домішки.

Вступ. Відомо, що у педіатричній практиці парацетамол визнано золотим стандартом лікування зниження температури тіла у дітей [1]. Вибір лікарської форми, як супозиторії, особливо обґрунтовано у випадках, коли у дитини підвищення температури тіла супроводжується ознаками інтоксикації (відмова від їжі, пиття, надмірна сонливість, блювання) та/або пероральна доставка лікарського засобу неможлива [2]. Тому актуальним напрямком є оцінка якості лікарських засобів валідованими аналітичними методиками, які дозволяють отримувати коректні результати щодо вмісту діючої речовини у супозиторіях для педіатричного застосування, а також вмісту нормованих супутніх домішок.

Для кількісної оцінки вмісту парацетамолу в субстанції (син. Acetaminophen (APAP), N-(4-Гідроксифеніл)acetamide (IUPACName) згідно монографії Європейської фармакопеї та Державної Фармакопеї України використовується метод титрування [3, 4], в твердих

формах (таблетки, капсули) – метод абсорбційної спектрофотометрії в ультрафіолетовій області [5]. Описані метод міцелярної електрокінетичної хроматографії [6], метод електрохімічного окислення і визначення парацетамолу на склоподібному вуглецевому електроді (GCE) з використанням різноманітних вольтамперометричних методик [7]. Літературний пошук методів визначення вмісту парацетамолу у супозиторіях показав, що такі дослідження дуже рідкі. Так, швидкий і ефективний метод мікроемульсійної рідинної хроматографії на масляній воді (MELC) був оптимізований і підтверджений для аналізу парацетамолу у складі супозиторіїв [8]. Фармакопейним методом є високоефективна рідинна хроматографія [9].

Також для субстанції парацетамолу фармацевтичного застосування згідно монографії Європейської фармакопеї визначено 14 домішок, але якість готових лікарських форм доводиться аналітичним визначенням основних токсичних домішок як 4-амінофенол (домішка К) та хлор ацетанілід (домішка J). Оскільки для домішок встановлено більш жорсткі критерії вмісту, то для їх визначення застосовують високочутливі методи, як метод поверхнево-розширеного рамановського розсіювання (SERS) [10], флуориметричний метод для кількісної оцінки малої кількості домішок (50 ppm) [11], метод міцелярної електрокінетичної хроматографії [6], високоефективної рідинної хроматографії з амперометричним детектуванням [12].

При розробці супозиторіїв з парацетамолом 80 мг нами як діючу речовину досліджували субстанцію парацетамол виробника Atabay, Туреччина. Компанія Atabay є виробником парацетамолу з 1965 року, та згідно даних DMF, синтезує речовину без використання галогенових ароматичних сполук, тому відсутнє утворення токсичних галогенових ароматичних речовин, таких як парахлорацетанілід в субстанції парацетамол [13]. 4-амінофенол (домішка К) є основним продуктом розпаду при гідролізі парацетамолу. Отже, в специфікацію для контролю якості дитячих супозиторіїв введено нормування та обов'язкове визначення ідентифікованої домішки 4-амінофенол.

Постановка завдання. Метою даної роботи було дослідження валідаційних характеристик методики кількісного визначення парацетамолу та його основної домішки в ректальних супозиторіях методами спектрофотометрії (СФ) та високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) відповідно.

Матеріали та методи дослідження. Наважки субстанції парацетамолу, стандартних зразків і реактивів зважували на аналітичних вагах «Mettler Toledo XP105DR» (Швейцарія). Величину рН вимірювали рН-метром «Mettler Toledo Seven Multi S40» (Швейцарія). У роботі застосували посуд класу А фірми «Simax» (Чехія).

Спектрофотометричні вимірювання проводили на спектрофотометрі UV VIS Lambda 35 («Perkin Elmer», USA) в кюветах $l=1$ см. Хроматографічні роботи виконали з застосуванням ВЕРХ системи Separations Module Waters 2695 з УФ-детектором Waters 2489.

В якості стандартного зразку парацетамолу (СЗ) використовували стандарт EP CRS, кат. № P0300000, в якості стандартного зразку Paracetamol impurity K (СЗ) використовували 4-амінофенол виробництва Sigma-Aldrich (Німеччина), кат. № A71328 із заявленим вмістом основної речовини 99,5% (GC). В якості плацебо супозиторіїв з парацетамолом застосовували твердий жир (суміш тригліцеридів C12-C18), марки Suppocire NAS 50 («Gattefosse», Франція).

При вивченні валідаційних характеристик застосовували реактиви: вода очищена, яку отримали з установки Milli Q, виробництва Millipore Corporation (Німеччина), натрію гідроксид Sigma-Aldrich, кат. № 06203, натрію 1-бутансульфонат Sigma-Aldrich, кат. № 19022-10G-F; етанол 96%, метанол Sigma-Aldrich (чистота 99.9%), мурашина кислота Sigma-Aldrich, кат. № 33015.

Контрольовані валідаційні характеристики обрані відповідно до вимог ДФУ та рекомендацій ІСН [14, 15], а саме для методики кількісного визначення парацетамолу відвалідовано характеристики: максимально допустима невизначеність результату аналізу Δ_{As} , невизначеність пробопідготовки Δ_{SP} , специфічність, лінійність, діапазон застосування, правильність; методику визначення вмісту домішки граничним випробуванням відвалідовано за характеристиками максимально допустима невизначеність результату аналізу Δ_{As} , специфічність, межа кількісного визначення. Розрахунки та статистичну обробку проводили згідно вимог ДФУ [16].

Досліджували наступні методики: Методика кількісного визначення парацетамолу у супозиторіях 80 мг/доза методом спектрофотометрії.

Приготування розчину випробування. До 1,250 г супозиторіїв додають 25,0 мл води очищеної та поміщають на водяну баню при температурі $(37 \pm 5)^\circ \text{C}$ до розплавлення основи. Витримують на водяній бані на протязі 5 хвилин при перемішуванні. Охолоджують на льодовій бані. Видаляють застиглий твердий жир та фільтрують водний шар крізь паперовий фільтр «синя стрічка», відкидаючи перші 5 мл фільтрату. До 1,0 мл отриманого розчину додають 25 мл 0,1 М розчину натрію гідроксиду і доводять об'єм розчину водою очищеною до 250,0 мл. До 10,0 мл отриманого розчину додають 2,5 мл 0,1 М розчину натрію гідроксиду та доводять об'єм розчину водою очищеною до 25,0 мл.

Приготування розчину порівняння. 0,040 г СЗ парацетамолу розчиняють у воді очищеної і доводять тим самим розчинником до 25,0 мл. До 1,0 мл отриманого розчину додають 10 мл 0,1 М розчину натрію гідроксиду і доводять об'єм розчину водою очищеною до 100,0 мл. До 1,0 мл отриманого розчину додають 2,5 мл 0,1 М розчину натрію гідроксиду та доводять об'єм розчину водою очищеною до 25,0 мл.

Компенсаційний розчин. 0,01 М розчину натрію гідроксиду. Вимірюють оптичну густину випробувального розчину та розчину порівняння відносно компенсаційного розчину на спектрофотометрі при $\lambda=257$ нм у кюветі з товщиною шару 10 мм. Розраховують вміст парацетамолу в супозиторіях (m), в мг/г, за формулою згідно ДФУ 2.2.25. Вміст парацетамолу ($\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2$) в одному супозиторії має бути від 76,0 до 84,0 мг в перерахунку на середню масу одного супозиторію.

Методика визначення 4-амінофенолу у супозиторіях 80 мг/доза методом вискоєфективної рідинної хроматографії.

Приготування розчину випробування. До 4,70 г супозиторіїв додають 20 мл етанолу Р і 30мл води очищеної, нагрівають на водяній бані при температурі $(37 \pm 5)^\circ \text{C}$ при перемішуванні до розплавлення основи. Витримують на водяній бані при температурі $(37 \pm 5)^\circ \text{C}$ на протязі 10 хвилин при перемішуванні скляною паличкою. Охолоджують на льодовій бані. Видаляють застиглий твердий жир та фільтрують водний шар крізь паперовий фільтр «синя стрічка», відкидаючи перші 3мл фільтрату. 5,0мл отриманого розчину доводять рухомою фазою в мірній колбі на 20мл до мітки.

Приготування розчину порівняння. 5 мг 4-амінофенолу розчиняють в метанолі та доводять об'єм розчину тим самим розчинником до 50,0мл. 1,0мл отриманого розчину доводять рухомою фазою в мірній колбі на 20мл до мітки.

Хроматографічні умови: Хроматографічна колонка Nucleosil C18 розміром 250×4,6mm, заповнена октадецилсилільним сорбентом з розміром часток 10 мкм; Рухома фаза – 0,01М розчин натрію 1-бутансульфонату у суміші мурашина кислота- метанол-вода очищена Р (0,4:15:85, об/об/об); Швидкість потоку рухомої фази – 1,5мл/хв.; Температура термостату колонки – 25°C; Довжина хвилі детектування – 272нм; Об'єм інжекції – 20 мкл.

Для оцінювання вмісту домішки, площу піку, одержаного на хроматограмі випробовуваного розчину, порівнюють із площею піку, що одержана на хроматограмі розчину порівняння. Вміст 4-амінофенолу для супозиторіїв має бути не більше 0,1 %.

Результати дослідження. Нами розроблена аналітична методика спектрофотометричного визначення кількісного вмісту парацетамолу в супозиторіях, яка є значно простішою при виконанні рутинного контролю серії лікарського засобу та рентабельною порівняно з методом ВЕРХ. Оскільки парацетамол у лужних розчинах дуже добре розчинний і утворений розчин характеризується максимумом світлопоглинання при $\lambda = 257$ нм, тому основний вплив на результат кількісного визначення діючої речовини має пробопідготовка, а саме попередня процедура виділення парацетамолу та його очистка від допоміжних речовин, що складають супозиторну основу.

Для валідаційних процедур використовували розрахунок прогнозованої повної невизначеності аналізу та її порівняння з максимально допустимою повною відносною невизначеністю. Максимально допустима невизначеність результату аналізу Δ_{As} при допусках вмісту $B = 5\%$, обчислена відповідно до встановлених вимог ДФУ становить $\Delta_{As} \leq 1.6\%$. Результати прогнозу невизначеності пробопідготовки наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати обчислення невизначеності пробопідготовки для визначення кількісного вмісту парацетамолу у супозиторіях

Операція пробопідготовки	Параметр розрахункової формули		Значення невизначеності
	РСЗ	РДЗ	
1.1 Взяття наважки парацетамолу (для РСЗ)	40		0,2мг/40 мг x100% = 0,50 %
1.2. Взяття наважки супозиторіїв (для РДЗ)		1250	0,2мг/1250 мг x100% = 0,016 %
2. Доведення до об'єму у мірній колбі 25,0 мл	25	25	0,23 %
3. Відбір аліквоти 1,0 мл	1	1	0,6 %
4. Доведення до об'єму у мірній колбі, мл	100	250	0,12 % / 0,08 %
5. Відбір аліквоти 10,0 мл	10	10	0,5 %
6. Доведення до об'єму у мірній колбі 25,0 мл	25	25	0,23 %

Обчислена невизначеність пробопідготовки становить:

$$\Delta_{sp} = \sqrt{0,50^2 + 0,23^2 + 0,6^2 + 0,12^2 + 0,5^2 + 0,23^2 + 0,016^2 + 0,23^2 + 0,6^2 + 0,08^2 + 0,5^2 + 0,23^2} = 1,305\%$$

$$1,305 \% > 0,51 \%$$

Розрахунок прогнозованої невизначеності кінцевої аналітичної операції становить:

$$\Delta_{FAO} = \sqrt{2} \cdot \frac{0,52 \cdot 1,645}{\sqrt{3}} = 0,692$$

Розрахунок повної прогнозованої невизначеності кінцевої аналітичної операції становить:

$$\Delta_{As} = \sqrt{\Delta_{SP}^2 + \Delta_{FAO}^2} = \sqrt{1,305^2 + 1,60^2} = 2,07 > \max \Delta_{As} = 1,6\%$$

Отже, повна прогнозована невизначеність аналітичної методики визначення парацетамолу не перевищує гранично допустимої невизначеності результатів, вимоги до невизначеності методик витримуються.

Специфічність методики кількісного визначення парацетамолу перевіряли, порівнюючи спектри поглинання розчинів порівняння та розчинів плацебо. Вимірювання проводили тричі зі зніманням кювет, при $\lambda=257\pm 2$ нм, в кюветах з товщиною шару 10 мм. Результати досліджень представлено в табл. 2 та (Рис.1.)

Таблиця 2

Визначення впливу фонового поглинання при перевірці специфічності аналітичної методики

A_{blank}	A_{st}	A_{blank} / A_{st}	Вимоги
0,0002	0,4689		
0,0003	0,4699		
0,0002	0,4697		
Середнє: 0,0002	Середнє: 0,4695	0,04	$\leq 0,96$

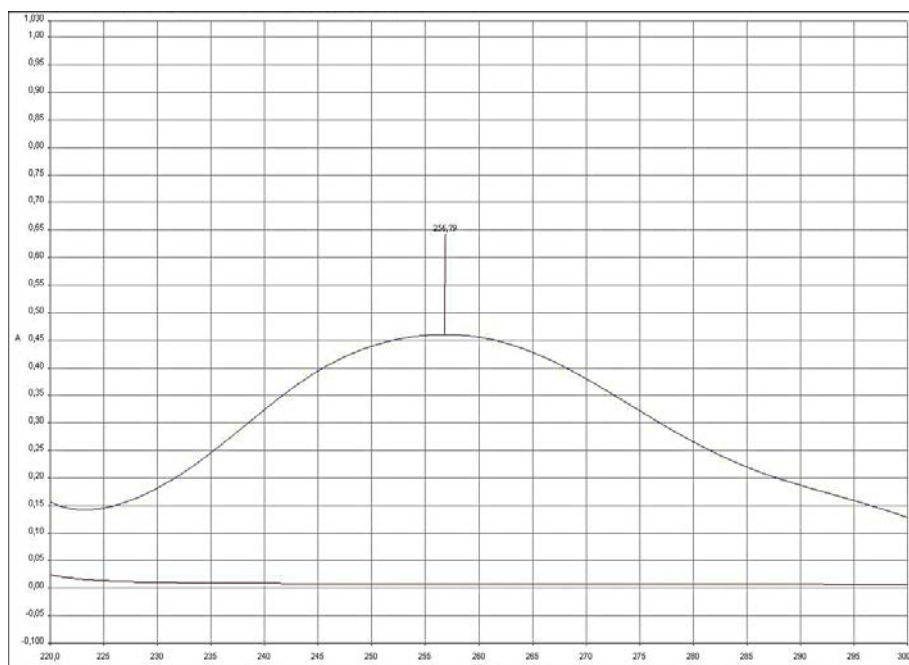


Рис. 1. Спектри поглинання розчину плацебо та розчину порівняння при $\lambda=257\pm 2$ нм, отримані в умовах перевірки специфічності методики

Як видно з (Рис.1.) на спектрі розчину плацебо відсутні максимуми поглинання, характерні для парацетамолу. Спектр розчину порівняння має максимум поглинання при

$\lambda=257\pm 2\text{nm}$ і співпадає зі спектром стандартного розчину. Отже, вимоги щодо специфічності методики витримуються.

Лінійну залежність досліджували в межах діапазону застосування аналітичної методики, для чого готували модельних 9 розчинів з вмістом парацетамолу від 80% до 120% та розчину порівняння (RS). Вимірювання проводили згідно умов методики, наведеної вище. В табл. 3 представлені результати розрахунку концентрацій парацетамолу, значень оптичних густин (A_i), а також значень фактично отриманих концентрацій парацетамолу.

Таблиця 3

Результати дослідження лінійної залежності аналітичного сигналу від концентрації парацетамолу у модельних розчинах

№	Концентрація парацетамолу, мг/мл «введено»	Назва розчину % від номінальної концентрації розчину	Оптична густина A_i	Концентрація парацетамолу, мг/мл «знайдено»
1		RS	0,4689	0,0064
2		RS	0,4699	0,0064
3		RS	0,4697	0,0064
4	0,0051	80%	0,3705	0,0051
5		80%	0,3700	0,0051
6		80%	0,3712	0,0051
7	0,0054	85%	0,3951	0,0054
8		85%	0,3948	0,0054
9		85%	0,3946	0,0054
10	0,0058	90%	0,4121	0,0058
11		90%	0,4120	0,0058
12		90%	0,4121	0,0058
13	0,0061	95%	0,4396	0,0061
14		95%	0,4395	0,0061
15		95%	0,4398	0,0061
16	0,0064	100%	0,4571	0,0064
17		100%	0,4572	0,0064
18		100%	0,4573	0,0064
19	0,0067	105%	0,4859	0,0067
20		105%	0,4864	0,0067
21		105%	0,4862	0,0067
22	0,007	110%	0,5090	0,0070
23		110%	0,5091	0,0070
24		110%	0,5093	0,0070
25	0,0074	115%	0,5342	0,0074
26		115%	0,5345	0,0074
27		115%	0,5341	0,0074
28	0,0077	120%	0,5535	0,0077
29		120%	0,5544	0,0077
30		120%	0,5551	0,0077

На Рис. 2 представлено графік залежності наведених значень при дослідженні лінійної залежності ($r_f = a + b \times C$).

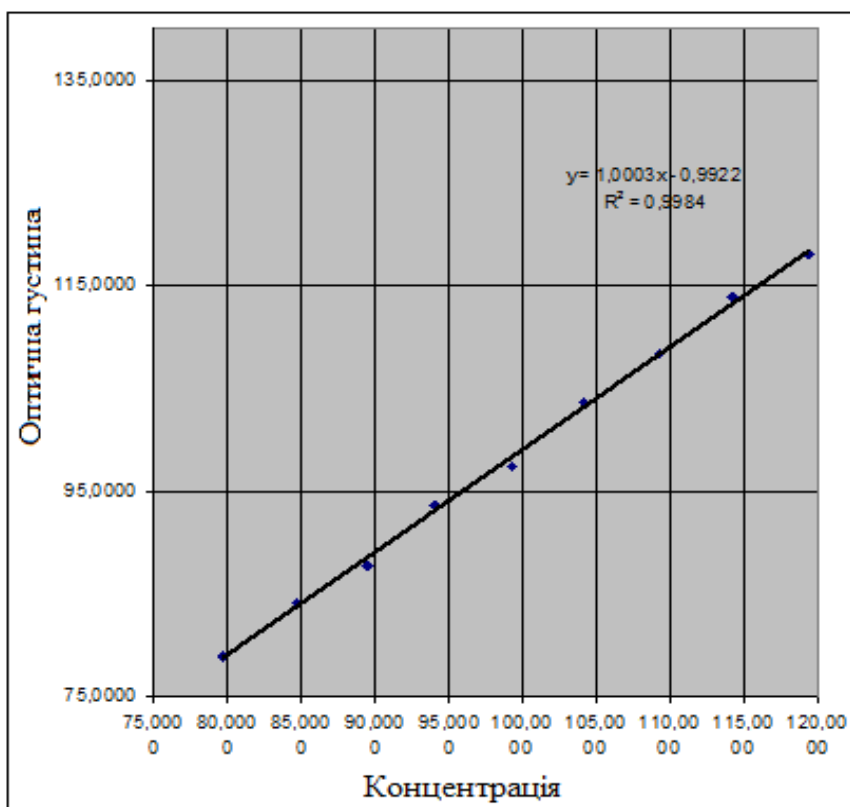


Рис.2. Графік лінійної залежності $y = a + b \times C$

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що методика в діапазоні концентрацій від 80 до 120 % від номінального значення для парацетамолу є лінійною, отже, вимоги до лінійності витримуються. Виконання критеріїв правильності та збіжності для визначення парацетамолу в готовій лікарській формі методом ВЕРХ наведена в табл. 4.

Таблиця 4

Результати аналізу модельних розчинів при дослідженні критерію «Правильність»

Модельний розчин	Концентрація парацетамолу, мг/мл	Введено у % до концентрації р-ну порівняння ($C_{i, \text{факт.}}$)	Оптична густина	Найдено у % до концентрації р-ну порівняння ($S_{i, \text{факт.}}$)	Найдено у % до введенного $X_i = 100 \cdot (S_{i, \text{факт.}} / C_{i, \text{факт.}}), \%$
80 %	0,0051	79,70	0,3706	78,94	99,04
85 %	0,0054	84,67	0,3948	84,09	99,32
90 %	0,0058	89,53	0,4121	87,77	98,04
95 %	0,0061	94,09	0,4396	93,63	99,51
100 %	0,0064	99,26	0,4572	97,38	98,11
105 %	0,0067	104,22	0,4862	103,56	99,37
110 %	0,007	109,28	0,5091	108,43	99,23
115 %	0,0074	114,24	0,5343	113,80	99,61
120 %	0,0077	119,31	0,5543	118,06	98,96
Середнє, $\bar{X}, \%$					99,02

Методика визначення парацетамолу в супозиторіях методом СФ задовольняє критеріям прийнятності валідаційного показника «Правильність». В табл. 5 наведені результати статистичної обробки отриманих даних.

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що методика коректна, вклад вільного члену незначний у порівнянні з максимально допустимою невизначеністю аналізу, валідаційні характеристики (специфічність, правильність, лінійність) обраної методики кількісного визначення відповідають критеріям прийнятності, встановленим і розрахованим для них.

Таблиця 5

Результати статистичної обробки перевірки методики кількісного визначення

Параметр	Розрахунок	Отримані значення
Вільний член	a	-0,9922
Кут нахилу	b	1,0003
Коефіцієнт кореляції	r	0,9984
Стандартне відхилення величини S_i :	$s_y = \sqrt{\frac{\sum S_i^2 - n \cdot \bar{S}^2}{n-1}}$	16,9674
Остаточне стандартне відхилення	$s_0 = \sqrt{\frac{\sum (S_i - (a + b \cdot C_i))^2}{n-2}}$	0,5797
Стандартне відхилення кута нахилу прямої	$s_b = \sqrt{\frac{s_y^2}{\sum (C_i - \bar{C})^2}}$	0,0151
Стандартне відхилення вільного члену	$s_a = s_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{C}^2}{\sum (C_i - \bar{C})^2}}$	1,5158
Критерій максимально допустимого значення залишкового стандартного відхилення	$s_0 \leq \max \Delta_{As} \cdot b / t(95\%, n-2) = 0,8442$	Виконується
Критерій статистичної незначущості відмінності a від нуля	$ a \leq t(95\%, n-2) \cdot s_a = 1,8946 \cdot 1,3837 = 2,8719$	Виконується
Критерій практичної незначущості відмінності a від нуля	$ a \leq \frac{0,32 \cdot \Delta_{As}}{1 - C_{\min} / 100} = 2,56$	Виконується
Критичне мінімально допустиме значення коефіцієнта кореляції	$r \geq \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_{As}}{s_y \cdot t(95\%; n-2)} \right)^2} = 0,9994$	Виконується

Розроблена методика контролю 4-амінофенолу у супозиторіях 80 мг/доза методом ВЕРХ, що забезпечує розділення парацетамолу та його основного продукту розпаду. Для валідації розраховали максимально допустиму невизначеність аналізу, що становить $\max \Delta_{As} \leq 16.0\%$.

Загальна невизначеність пробопідготовки має бути не більше 5,12%. Розрахунки прогнозу невизначеності пробопідготовки наведені в (табл. 6).

Розрахунки проводили, як наведено вище. Розрахунок повної прогнозованої невизначеності кінцевої аналітичної операції склав $\Delta_{As} = 15,89\% \leq 16\%$. Отже, вимоги до невизначеності методики витримуються.

Придатність хроматографічної системи. Перед початком експериментальних валідаційних робіт проаналізували розчин для перевірки придатності хроматографічної системи (Рис. 3). У табл. 7 наведені результати щодо придатності хроматографічної системи.

Таблиця 6

Розрахунки прогнозу невизначеності пробо підготовки

Операція пробопідготовки	Параметр розрахункової формули	Значення невизначеності
Випробувальний розчин		
Взяття наважки супозиторіїв	4,7	0,0044 %
Відбір аліквоти 5,0 мл	5	0,6%
Доведення до об'єму у мірній колбі 20,0 мл	20	0,23%
Розчин стандартного зразку		
Взяття наважки РСЗ 4-амінофенолу	5	4%
Доведення до об'єму у мірній колбі 50,0 мл	50	0,17%
Відбір аліквоти 1,0 мл	1	0,6%
Доведення до об'єму у мірній колбі 20,0 мл	20	0,23%

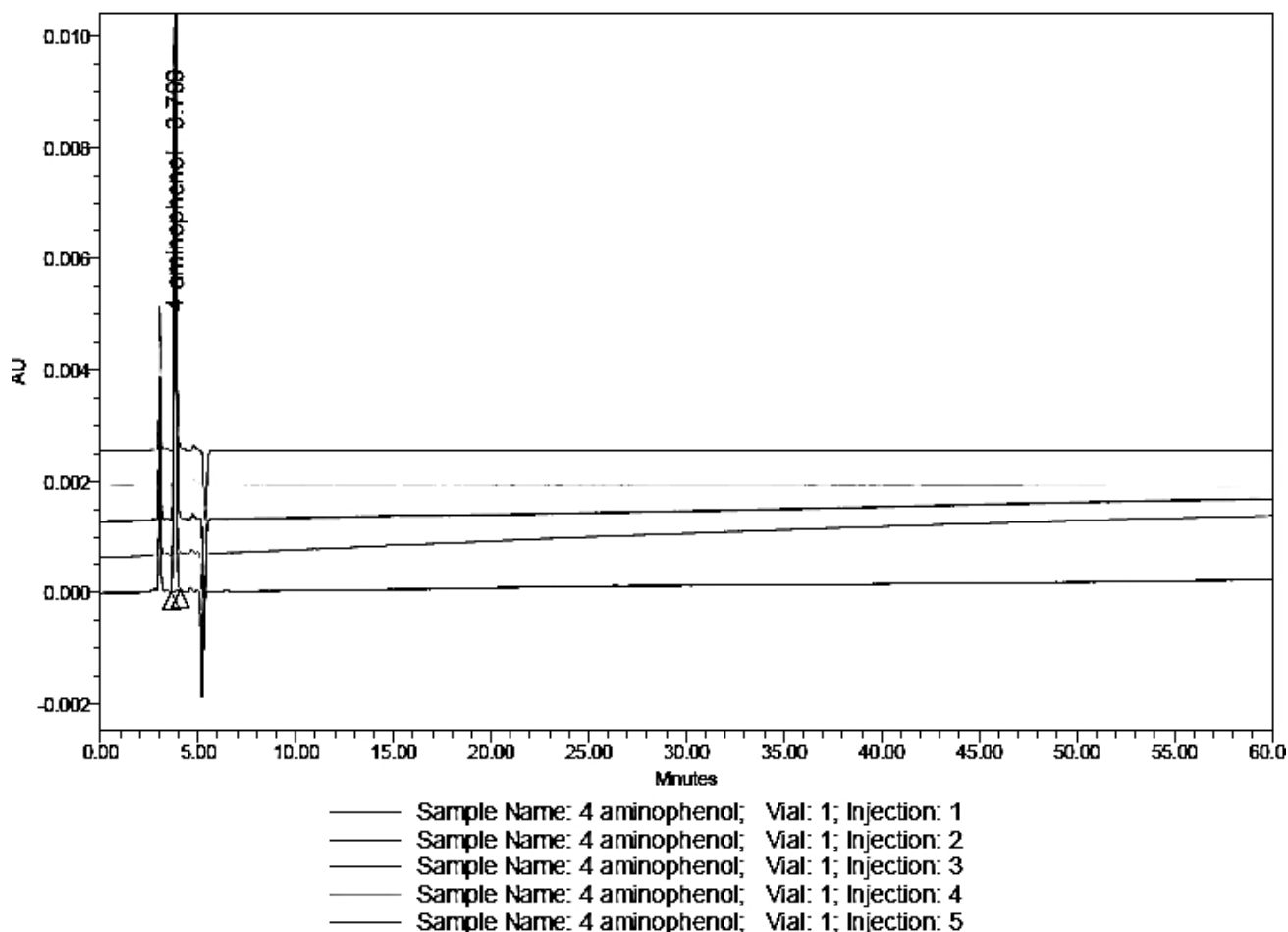


Рис. 3. Хроматограми розчину для перевірки придатності хроматографічної системи

Таблиця 7

Перевірка придатності хроматографічної системи

№ інжекції	4- амінофенол	
	Час витримки	Площа піку
1	3,799	76380
2	3,809	76918
3	3,822	76879
4	3,834	76726
5	3,834	76654
Середнє значення	3,820	76613
RSD, %	0,400	0,269
Висновок ПХС	виконується	

При хроматографуванні розчину порівняння було показано, що відносне стандартне відхилення відносин площ піків 4-амінофенола становить 0,269%, що менше критичного значення (2,0%). Отже, хроматографічна система є придатною для виконання методики.

Специфічність. Визначено, що методика дозволяє точно і правильно встановити зміст ідентифікованої домішки 4-амінофенола в присутності всіх інших компонентів. Показано відсутність вкладу плацебо, тобто в плацебо не міститься речовина, час утримання якого відповідає часу утримування 4-амінофенола розчину порівняння. Час утримування 4-амінофенола на хроматограмі модельного розчину відповідає часу утримування 4-амінофенола розчину порівняння, то можна стверджувати, що методика є специфічною. Отримані хроматограми наведені на Рис. 4.

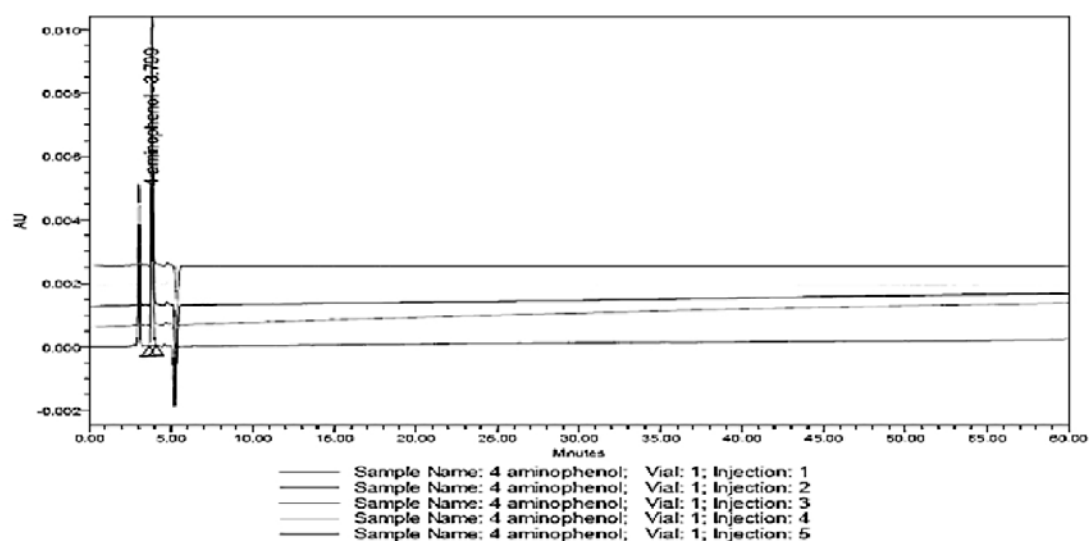
Межі виявлення. При проведенні експерименту встановлена - мінімальна концентрація речовини, при якій має виконуватися співвідношення: сигнал/шум > 2. Для проведення експерименту був приготований ряд послідовних розведень розчину порівняння згідно з протоколом валідації.

Межа виявлення 4-амінофенола, при якому виконується співвідношення сигнал/шум складає 10% від вихідної концентрації розчину порівняння (0,5 мкг/мл).

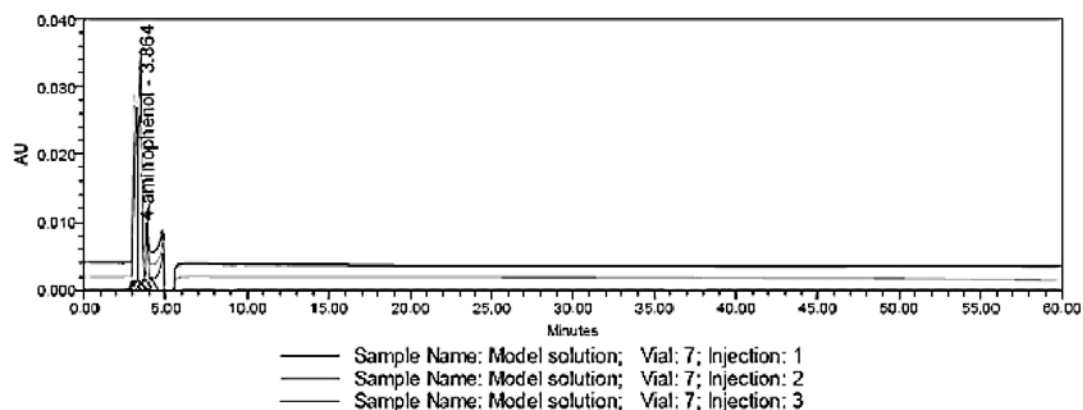
Таблиця 8

Межі виявлення 4-амінофенолу

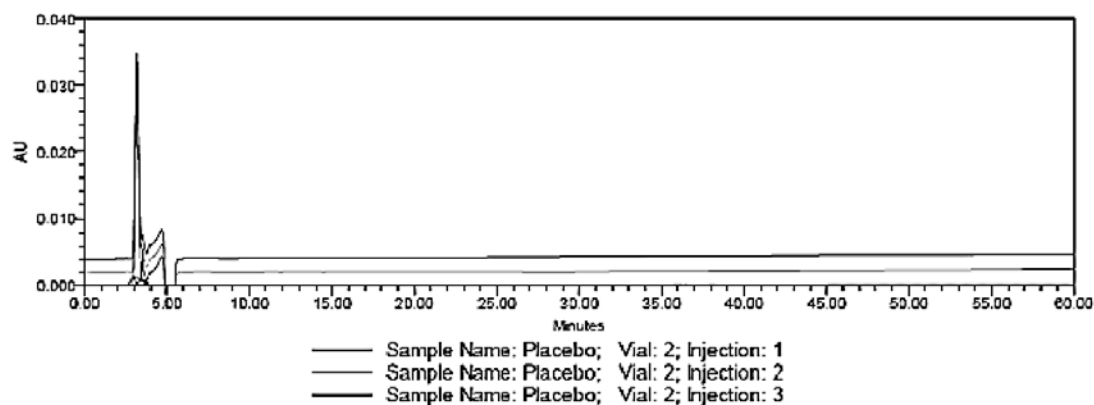
Концентрація модельних розчинів, % від розчину порівняння	Середнє значення площі піку 4-амінофенола	Середнє значення відношення сигнал/шум	Критерії прийнятності	Висновок
2	-	-	>2	Не виконується
5	-	-	>2	Не виконується
10	9068	26,2	>2	Виконується
20	12369	34,6	>2	Виконується



Хроматограма розчину порівняння

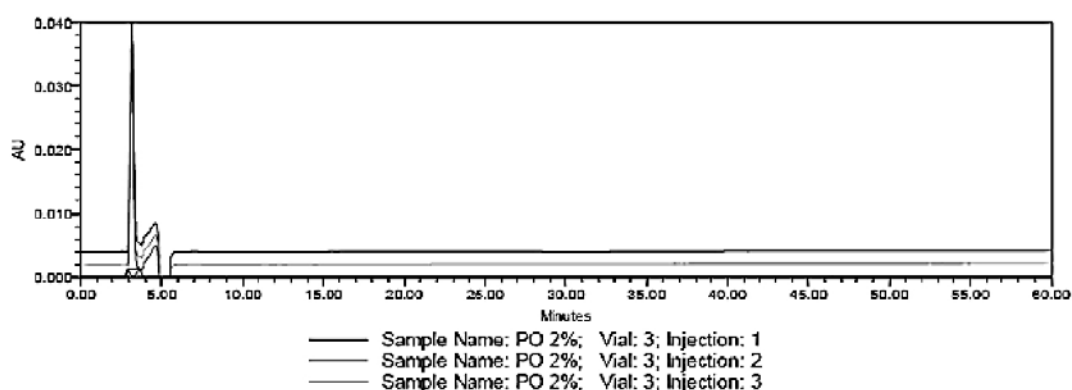


Хроматограма модельного розчину перевірки специфічності методики

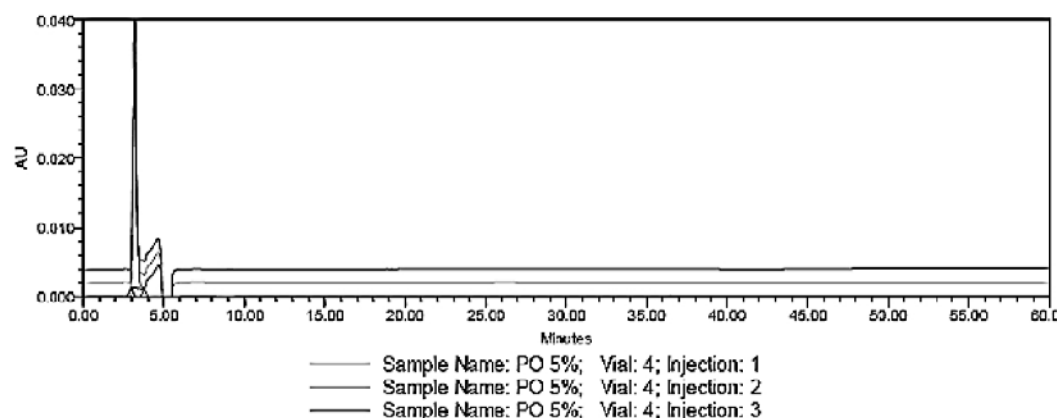


Хроматограма розчину плацебо перевірки специфічності методики

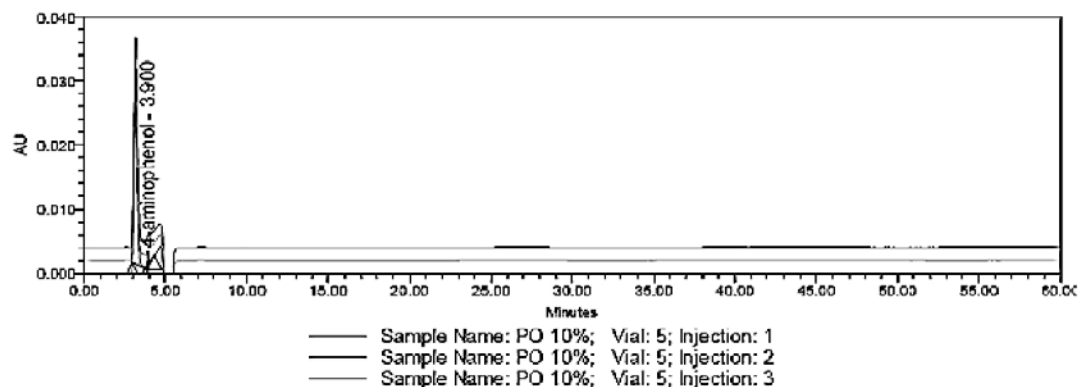
Рис.4. Хроматограми, що підтверджують специфічність методики



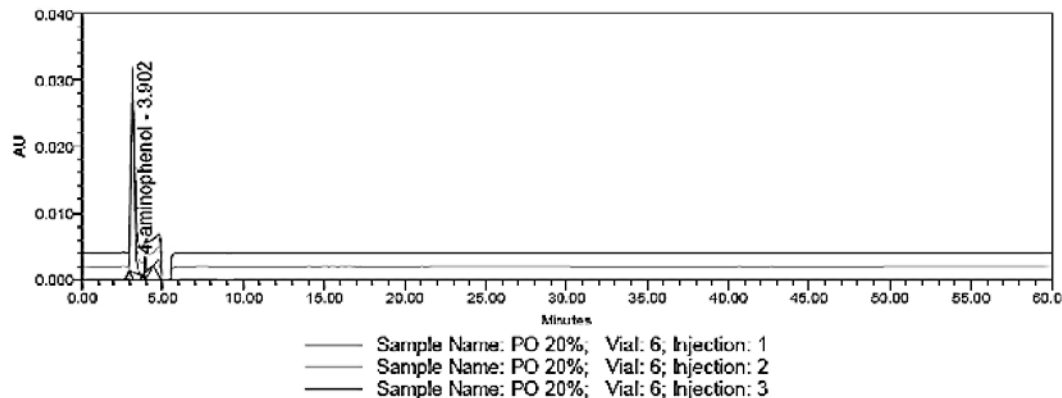
Хроматограма 2% модельного розчину межі виявлення 4-амінофенола



Хроматограма 5% модельного розчину межі виявлення 4-амінофенола



Хроматограма 10% модельного розчину межі виявлення 4-амінофенола



Хроматограма 20% модельного розчину межі виявлення 4-амінофенола

Рис. 5. Хроматограми модельних розчинів межі виявлення 4-амінофенолу

Експериментально встановлено, що межа виявлення 4-амінофенола становить 0,5мкг/мл. Отже, за дослідженими валідаційними характеристиками методика коректна та може бути відтворена в інших лабораторіях.

Висновок. Проведено дослідження валідаційних характеристик методики кількісного визначення парацетамолу та його основної домішки 4-амінофенола в ректальних супозиторіях.

Визначені специфічність, лінійність, правильність, максимально допустима невизначеність результату аналізу ΔA_s , невизначеність пробопідготовки ΔSP , діапазон застосування, правильність методик кількісного вмісту парацетамолу та домішки 4-амінофенола.

Підтверджена лінійність для кількісного визначення вмісту парацетамолу в діапазоні від 80 до 120 % від номінального значення. Доведено, що лінійність, точність і правильність визначення парацетамолу в зазначеному діапазоні прийнятна, методика кількісного визначення систематичною похибкою не обтяжена. Проведено статистичну обробку експериментальних даних, коефіцієнт кореляції лінійної залежності (r) між введеними і знайденими значеннями для кількісного вмісту парацетамолу, становить $>0,990$, що свідчить про коректність методики.

Встановлено межу виявлення 4-амінофенола, при якому виконується співвідношення сигнал/шум - 10% від вихідної концентрації розчину порівняння (0,5 мкг/мл). Всі контрольовані валідаційні характеристики відповідають критеріям прийнятності і можуть бути використані для контролю супозиторіїв з парацетамолом для застосування у педіатрії.

Література

1. Kogan Michael D. Over-the-counter Medication Use Among US Preschool-age Children / Michael D. Kogan, Gregory Pappas, Stella M. Yu, et al. // JAMA. 1994,272:1025-1030. DOI:https://doi.org /10.1001/jama.1994.03520130063034
2. Kalmár É. Validated HPLC Determination of 4-Dimethylaminoantipyrine in Different Suppository Bases / É Kalmár, B. Kormányos, G. Szakonyi, G. Dombi // Indian J PharmSci., 2014. - № 76(1). - P. 31–37. PMID: 24799736; PMCID: PMC4007253
3. European Pharmacopoeia. 9th Edition. – European Directorate for the Quality of Medicines (EDQM). – Council of Europe, 67075 Strasbourg Cedex, France 2016. – 4016 p.
4. Парацетамол // Державна Фармакопея України / Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». — 2-е вид. — Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2014. — Т. 2. — С.525-527.
5. Парацетамол таблетки // Державна Фармакопея України / Державне підприємство «Науково-експертний фармакопейний центр». – 2-е вид. — Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр

References

1. Kogan M., Pappas G., Stella M. (1994). Over-the-counter Medication Use Among US Preschool-age Children. JAMA, P.1025-1030. [in English]
2. Kalmár É., Kormányos B., Szakonyi G., Dombi G. (2014). Validated HPLC Determination of 4-Dimethylaminoantipyrine in Different Suppository Bases. Indian J PharmSci. Vol. 76(1), 31–37. [in English]
3. European Directorate for the Quality of Medicines (EDQM) (2016). European Pharmacopoeia. Vol. 9. (P.2016-4016). France [in English]
4. Derzhavne pidpriemstvo Ukrainskyi naukovi farmakopeinyi tsentr yakosti likarskykh zasobiv (2014). Derzhavna Farmakopeia Ukrainy [State Pharmacopoeia of Ukraine]. Vol. 2(2) (P. 525-527). Kharkiv. [in Ukrainian]
5. Derzhavne pidpriemstvo Ukrainskyi naukovi farmakopeinyi tsentr yakosti likarskykh zasobiv (2018). Derzhavna Farmakopeia Ukrainy [State Pharmacopoeia of Ukraine]. Vol. 2(3). P. 635-637. Kharkiv. [in Ukrainian]
6. Németh T., Jankovics P., Németh-Palotás

- якості лікарських засобів», 2018. — Т. 3. — С. 635-637.
6. Németh T., Jankovics P., Németh-Palotás J., Koszegi-Szalai H. Determination of paracetamol and its main impurity 4-aminophenol in analgesic preparations by micelle relectrokinetic chromatography. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2008 Aug 5;47(4-5):746-749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2008.03.003>.
7. Engin C., Yilmaz S., Saglikoglu G., Yagmur S., Sadikoglu M. Electroanalytical Investigation of Paracetamol on Glassy Carbon Electrode by Voltammetry. *International Journal of Electrochem. Sci.*, 2015. – V.10. – P.1916 – 1925.
8. Mcevoy, Eamon & Donegan, Sheila & Power, Joe & Altria, Kevin. (2007). Optimisation and validation of a rapid and efficient microemulsion liquid chromatographic (MELC) method for the determination of paracetamol (acetaminophen) content in a suppository formulation. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 44. 137-43. DOI: 10.1016/j.jpba.2007.02.025.
9. Acetaminophen Suppositories. USP 39–NF 34, P. 2298
10. De Bleye C., Dumont E., Rozet E., Sacré P.Y., Chavez P.F., Netchacovitch L., Piel G., Hubert P., Ziemons E. Determination of 4-aminophenol in a pharmaceutical formulation using surface enhanced Raman scattering: from development to method validation. *Talanta*. 2013, Nov 15;116:899-905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.07.084>.
11. Dejaegher B., Bloomfield M.S., Smeyers-Verbeke J., Vander Heyden Y.. Validation of a fluorimetric assay for 4-aminophenol in paracetamol formulations. *Talanta*. 2008 Mar 15;75(1):258-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.11.029>.
12. Wyszeccka-Kaszuba E., Warowna - Grześkiewicz M., Fijałek Z. Determination of 4-aminophenol impurities in selected pharmaceutical preparations by HPLC method with amperometric detection. *ActaPolPharm* 2001, Vol.58. - №5. –p.325-329.
13. Салій О. О. Дослідження впливу фізико-хімічних властивостей парацетамолу на вивільнення із супозиторіїв / О. О. Салій, О. П. Баула, І. М. Бовгіря // *КиївPharma-2017. Фармакологія та фармацевтична технологія в забезпеченні активного довголіття : збірник наукових праць III Міжнародної науково-практичної конференції (8 грудня 2017 р., м. Київ) / під заг. ред. В. В. Страшного. – Київ : КНУТД, 2017. – С. 115-119.*
14. Валідація аналітичних методик і випробувань // *Державна Фармакопея України / Державне підприємство «Науково-експертний фармакопейний центр».* – 2-е вид. — Харків: J., Koszegi-Szalai H. (2008) Determination of paracetamol and its main impurity 4-aminophenol in analgesic preparations by micelle relectrokinetic chromatography. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. Vol. 47(4-5), 746-749. [in English]
7. Engin C., Yilmaz S., Saglikoglu G., Yagmur S., Sadikoglu M. (2015) Electroanalytical Investigation of Paracetamol on Glassy Carbon Electrode by Voltammetry. *International Journal of Electrochem. Sci.* – V.10. – P.1916 – 1925. [in English]
8. Mcevoy, Eamon & Donegan, Sheila & Power, Joe & Altria, Kevin. (2007). Optimization and validation of a rapid and efficient micro emulsion liquid chromatographic (MELC) method for the determination of paracetamol (acetaminophen) content in a suppository formulation. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, – Vol. 44, P.137-143 [in English]
9. Acetaminophen Suppositories. USP 39–NF 34, P. 2298 [in English]
10. De Bleye C., Dumont E., Rozet E., Sacré P.Y., Chavez P.F., Netchacovitch L., et al (2013). Determination of 4-aminophenol in a pharmaceutical formulation using surface enhanced Raman scattering: from development to method validation. *Talanta*, 899-905. [in English]
11. Dejaegher B., Bloomfield M.S., Smeyers-Verbeke J., Vander Heyden Y. (2008). Validation of a fluorimetric assay for 4-aminophenol in paracetamol formulations. *Talanta*. 258-265. [in English]
12. Wyszeccka-Kaszuba E., Warowna - Grześkiewicz M., Fijałek Z (2001). Determination of 4-aminophenol impurities in selected pharmaceutical preparations by HPLC method with amperometric detection . *ActaPolPharm*, Vol.58, 325-329. [in English]
13. Saliy, O. O., Baula, O. P., Bovhyria, I. M. (2017). *KyivPharma-2017. Farmakolohiia ta farmatsevychna tekhnolohiia v zabezpechenni aktyvnoho dovholittia: zbionyk naukovykh prats III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kyiv: KNUOTD, 115–119. [in Ukrainian]
14. Derzhavne pidpriemstvo Ukrainyskyi naukovyi farmakopeinyi tsentr yakosti likarskykh zasobiv (2015). *Derzhavna Farmakopeia Ukrainy [State Pharmacopoeia of Ukraine]*. Vol. 2(1). P. 910-929. Kharkiv. [in Ukrainian]
15. Grizodub A.I., Evtifeeva O.A., Proskurina

Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2016. — Т. 1. — С. 910-929.

15. Гризодуб А.И., Евтифеева О.А., Проскурина К.И., Безумова О.В. Стандартизованная процедура валидации спектрофотометрических методик количественного определения лекарственных средств в варианте метода показателя поглощения. Сообщение 2. // Фармаком. – 2014. - № 2. – С. 45-53.

16. Статистичний аналіз результатів хімічного експерименту // Державна Фармакопея України / Державне підприємство «Науково-експертний фармакопейний центр». – 2-е вид. — Доповнення 2. — Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2014. — С. 77-112.

K.I., Bezumova O.V. (2014) Standartizovannaja procedura validacii spektrofotometricheskikh metodik kolichestvennogo opredelenija lekarstvennyh sredstv v variante metoda pokazatelja pogloshhenija. [A standardized procedure for the validation of spectrophotometric methods for the quantitative determination of drugs in a variant of the absorption index method] *Farmakom*. Vol. 2. 45-53. [in Russian]

16. Derzhavne pidpriemstvo Ukrainskyi naukovyi farmakopeinyi tsentr yakosti likarskykh zasobiv (2018). Derzhavna Farmakopeia Ukrainy [State Pharmacopoeia of Ukraine]. Vol. 2 (1). P. 77-112. Kharkiv. [in Ukrainian]

SALIY OLENA

e-mail: saliy.oo@knutd.edu.ua

Researcher ID: AAC-5721-2019

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7103-2083>

Department of Pharmaceutical Industry of the Kyiv National University of Technologies and Design

MANATSIUK VIKTORIIA

e-mail: v.manatsyuk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1731-1019>

Department of Pharmaceutical Industry of the Kyiv National University of Technologies and Design

KUZMINA GALINAIVANIVNA

e-mail: galina_kuzmina@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0691-8563>

Department of Pharmaceutical Industry of the Kyiv National University of Technologies and Design

FUKLEVA LARYSA

e-mail: fukleva@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2930-0619>

Department of Pharmacognosy, Pharmaceutical Chemistry and Preparations Technology of the Faculty of Postgraduate Education

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАЛИДАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАЦЕТАМОЛА И ЕГО ОСНОВНОЙ ПРИМЕСИ В РЕКТАЛЬНЫХ СУППОЗИТОРИЯХ

САЛИЙ О.О.¹, КУЗЬМИНА Г.И.¹, ФУКЛЕВА Л.А.², МАНАЦЮК В.В.¹

¹Киевский национальный университет технологий и дизайна

²Запорожский государственный медицинский университет

Цель. Исследование валидационных характеристик методики количественного определения парацетамола и его основной примеси 4-аминофенола в ректальных суппозиториях методами спектрофотометрии (УФ) и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Методика. Спектрофотометрические измерения проводили на спектрофотометре UV VIS Lambda 35 («Perkin Elmer», USA) в кюветах $l = 1$ см. Использовали жидкостный хроматограф Waters 2695 с УФ-детектором Waters 2489, а также хроматографическую колонку Nucleosil C18 размером $250 \times 4,6$ мм, заполненную октадецилсилильным сорбентом с размером частиц 10 мкм. При изучении валидационных характеристик применяли реактивы: вода очищенная, которую получили по установке Milli Q, производства Millipore Corporation (Германия), натрия гидроксид Sigma-Aldrich, кат. № 06203, натрия 1-бутансульфонат Sigma-Aldrich, кат. № 19022-10G-F; этанол 96%, метанол Sigma-Aldrich (чистота 99.9%), муравьиная кислота Sigma-Aldrich, кат. № 33015.

Результаты. Подтверждены валидационные характеристики как специфичность, правильность, прецизионность. Установлено полную прогнозируемую неопределенность аналитической методики количественного определения и предел количественного определения основной примеси парацетамола, при котором выполняется соотношение сигнал/шум - 10% от

исходной концентрации раствора сравнения (0,5 мкг/мл). Подтверждена линейность для количественного определения содержания парацетамола в диапазоне от 80 до 120% от номинального значения. Проведено статистическую обработку экспериментальных данных, коэффициент корреляции линейной зависимости (r) между введенными и найденными значениями для количественного определения парацетамола, составляет $> 0,990$, что свидетельствует о корректности методики.

Научная новизна. Разработаны и валидированы методики количественного определения парацетамола и его основной примеси в суппозиториях. Методика количественного определения парацетамола в суппозиториях значительно проще при выполнении рутинной контрольной серии лекарственного средства и рентабельной по сравнению с методом ВЭЖХ.

Практическая значимость. Полученные результаты эксперимента свидетельствуют, что по исследованным валидационным характеристикам методика корректна и может быть воспроизведена в других лабораториях.

Ключевые слова. Парацетамол, 4-аминофенол, ректальные суппозитории, валидационные характеристики, количественное определение, примеси.

INVESTIGATION OF VALIDATION CHARACTERISTICS OF THE METHOD OF QUANTITATIVE DETERMINATION OF PARACETAMOL AND ITS MAIN IMPURITY IN RECTAL SUPPOSITORIES

SALIY O.O.¹, KUZMINA G.I.¹, FUKLEVA L.A.², MANATSYUK V.V.¹

¹ Kyiv National University of Technologies and Design

² Zaporizhia State Medical University

Purpose. Exploration of validation characteristics of the method for the quantitative determination of paracetamol and its main impurity 4-aminophenol in rectal suppositories by spectrophotometry (UV) and high performance liquid chromatography (HPLC).

Methodology. Spectrophotometric measurements were carried out on a UV VIS Lambda 35 spectrophotometer (Perkin Elmer, USA) in cuvettes $l = 1$ cm. We used a Waters 2695 liquid chromatography with a Waters 2489 UV-detector, as well as a Nucleosil C18 chromatographic column with a size of 250×4.6 mm, filled with octadecylsilyl sorbent with a particle size of 10 microns. We used reagents: purified water, which was obtained from the Milli Q plant, manufactured by Millipore Corporation (Germany), sodium hydroxide Sigma-Aldrich, cat. № 06203, sodium 1-butanedisulfonate Sigma-Aldrich, cat. № 19022-10G-F; ethanol 96%, methanol Sigma-Aldrich (purity 99.9%), formic acid Sigma-Aldrich, cat. № 33015.

Findings. Validation characteristics were confirmed as specificity, correctness, precision. The total predicted uncertainty of the analytical method for quantitative determination and the limit of quantitative determination of the main impurity of paracetamol, at which the signal-to-noise ratio is fulfilled, is 10% of the initial concentration of the reference solution ($0.5 \mu\text{g} / \text{ml}$). Confirmed linearity for quantitative determination of paracetamol content in the range of 80 to 120% of the nominal value. Statistical processing of experimental data was carried out; the correlation coefficient of the linear dependence (r) between the entered and found values for the quantitative determination of paracetamol is > 0.990 , which indicates the correctness of the method.

Originality. Methods for the quantitative determination of paracetamol and its main impurity in suppositories have been developed and validated. The method for quantitative determination of paracetamol in suppositories is significantly simpler for routine control of a batch of drugs and is cost-effective compared to the HPLC method.

Practical value. The obtained experimental results indicate that according to the studied validation characteristics, the technique is correct and can be reproduced in other laboratories.

Keywords. Paracetamol, 4-aminophenol, rectal suppositories, validation characteristics, quantification, impurities.

УДК 537.86-
022.513.2

БУТЕНКО О. О., ЧЕРНИШ О. В.,
ХОМЕНКО В. Г., ТВЕРДОХЛІБ В. С., БАРСУКОВ В. З.

Київський національний університет технологій та дизайну

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ НАНОМАТЕРІАЛІВ НА ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КОМПОЗИТАМИ

Мета. Використання наноматеріалів в складі композитів для підвищення ефективності захисного покриття від впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ).

Методика. Дослідження зразків проводились за допомогою обладнання для вимірювання екрануючих властивостей матеріалів компанії Кеусот Корп. (Японія). Ультразвукове диспергування наноматеріалів було виконано за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-А1200Т. Питомий опір композитних покриттів виміряний з використанням стандартизованої 4-х електродної комірки ST2558B-F01 для вимірювання електропровідності матеріалів.

Результати. Визначений вплив різних наноматеріалів на захисні властивості тонких вуглець-полімерних покриттів. Досліджені наступні наноматеріали: оксид та карбід бору, оксид нанозаліза, вуглецеві нанотрубки та графен. Встановлена залежність питомого опору покриття та ефективності екранування від типу наноматеріалу в композитному зразку. Експериментально доведено, що методика приготування фарби з використанням ультразвукового диспергування може у 2,5 рази покращити захист від ЕМВ. Встановлено, що графен має незначну перевагу у екрануванні ЕМВ у порівнянні з іншими вуглецевими матеріалами. Отримані результати вказують, що такі неелектропровідні матеріали як оксиди нанозаліза, бору та карбід бору можуть бути досить ефективними для створення радіопоглинаючих композитних матеріалів.

Наукова новизна. В роботі пропонується новий підхід для одержання тонких захисних покриттів від ЕМВ з використанням наноматеріалів, таких як карбід бору, оксид бору, оксид нанозаліза, деяких типів вуглецевих нанотрубок та графенів. В роботі запропонований унікальний алгоритм ультразвукового диспергування матеріалів для виготовлення композитних зразків. Вперше проведений аналіз радіопоглинаючих властивостей покриттів на основі вітчизняних матеріалів з використанням міжнародних стандартизованих методів дослідження.

Практична значимість. Композиційні покриття насамперед можуть застосовуватися для захисту людини від електромагнітного випромінювання. Матеріали можуть знайти широке використання для вирішення проблем екранування приміщень, обладнання, у військовій та медичній галузі тощо.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, наноматеріали, радіоекрануючі композиційні матеріали, захисні покриття.

Вступ. Динаміка розвитку сучасного світу пов'язана зі збільшенням кількості електронного обладнання, що призводить до зростання електромагнітного випромінювання (ЕМВ) у навколишнє середовище. ЕМВ негативно впливає на здоров'я людини, створює проблеми під час роботи різного обладнання, загрожує інформаційній безпеці. Сьогодні, окрім захисту людей та електронного обладнання від впливу електромагнітних полів, необхідним є забезпечення безперебійного функціонування засобів бездротового зв'язку [1]. Персонал, який працює в умовах впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів, повинен бути забезпечений засобами колективного та індивідуального захисту відповідно до державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань [2]. Слід зазначити, що найбільш небезпечними для людини є магнітні поля наднизької частоти (гармонік та інтергармонік), а також електромагнітні випромінювання ультрависоких частот, які притаманні засобам бездротового зв'язку та радіотехнічним

об'єктам різного призначення. Найпоширеніший захист від ЕМВ здійснюють, як правило, за допомогою спеціальних екранів на основі композиційних матеріалів.

Наноматеріали дозволяють створювати нові композиційні матеріали з рекордними характеристиками. Завдяки своїм властивостям наноматеріали широко застосовуються в різних галузях науки і техніки. Найбільш успішне застосування знаходять наночастки (НЧ) металів та їх оксидів, вуглецевих нанотрубок та напівпровідників при виготовленні сенсорних пристроїв, компонентів нано- та мікроелектроніки, сепараційних матеріалів [3-6]. Останнім часом, дослідженням наноматеріалів присвячено багато робіт [7-9]. Очікується, що використання наноматеріалів в композитних матеріалах дозволить вирішити низку важливих завдань, а саме, поєднання явища розсіювання електромагнітних хвиль та магнітних і діелектричних втрат, що дозволяє варіювати властивостями таких матеріалів в широкому діапазоні частот. Для таких матеріалів найчастіше використовують магнітні наночастинки оксиду заліза, зокрема, магнетит (Fe_3O_4) [10-11].

Постановка завдання. Оцінити вплив наночасток оксиду нанозаліза, оксиду та карбїду бору, вуглецевих нанотрубок і графену на електропровідність та екрануючі властивості від ЕМВ композитних покриттів.

Результати дослідження. На сьогоднішній день найбільш ефективними матеріалами для захисту від ЕМВ безумовно є композитні матеріали різної структури. Нами раніше показано у роботі [12], що керування захисними властивостями покриття здійснюється зміною концентрації вуглецевих матеріалів у діелектричній матриці. Але діапазон керованості невеликий. При цьому головною технологічною задачею є рівномірність розподілу вуглецевих матеріалів в полімерній матриці. Найбільш ефективним методом покращення характеристик захисного покриття є додавання у діелектричну матрицю дрібнодисперсного графіту. Подальше покращення результатів можливе за рахунок додавання у покриття наноматеріалів. Проте і у цьому випадку виникають певні технологічні труднощі, а саме рівномірність розподілу наноматеріалів в об'ємі захисного покриття. Дослідження свідчать, що одним із можливих напрямів вирішення зазначеної проблеми є використання ультразвукової обробки наноматеріалів.

Для вивчення впливу наноматеріалів у базове композитне вуглець-полімерне захисне покриття [13] були додані різні наноматеріали. В якості полімерного зв'язуючого застосовувався полівінілбутираль, а в якості основного вуглецевого наповнювача композитного матеріалу були використанні вітчизняні графітові матеріали марок КГП С-1 та ГАК-1. Для виготовлення дослідних зразків захисних покриттів були використані зарубіжні та вітчизняні наноматеріали, а саме: оксид бору, карбід бору та оксид нанозаліза [14] (Табл.1).

Відомо, що ефективність екранування залежить від відбиття та поглинання електромагнітної хвилі матеріалами та визначається співвідношенням хвильового опору розповсюдження хвилі та хвильового опору матеріалу екрана. Отже, меншому опору матеріалу відповідають більші коефіцієнти відбиття. Відомо, що коефіцієнти відбиття залежать виключно від електрофізичних характеристик матеріалу захисного покриття і не залежать від його товщини. Щодо коефіцієнтів поглинання, то цей показник є критичним.

Таблиця 1

Наноматеріали композитних матеріалів

Матеріал	Позначення	Виробник
Карбід бору	B ₄ C(1/0)	Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ
Карбід бору	B ₄ C(10/5)	Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ
Карбід бору	B ₄ C(20/7)	Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ
Оксид бору	B ₂ O ₃ №8,9/1	Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ
Оксид нанозаліза №1	Fe-1	Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м.Сєвєродонецьк
Оксид нанозаліза №2	Fe-2	Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м.Сєвєродонецьк
Оксид нанозаліза №3	Fe-3	Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м.Сєвєродонецьк
Графен (98%)	G250-H	Компанія Sinocarbon, Китай
Графен (98%)	G1000-H	Компанія Sinocarbon, Китай
Графен	xGnP-C-750	Компанія XG sciences, Китай
Вуглецеві нанотрубки	C 150 P	Компанія Bayer, Німеччина
Вуглецеві нанотрубки Graphistrength	C100	Компанія ARKEMA, Франція

При обиранні товщини покриття слід враховувати еквівалентну глибину проникнення хвилі у товщину захисного покриття. Нами виготовлені та досліджені покриття товщиною 60-200 мкм, що повинні ефективно працювати в частотному діапазоні від 500 МГц до 18 ГГц. Враховуючи вище наведене, особлива увага була приділена змінам питомого опору покриття після введення наноматеріалів. Зразок поміщали в чотирьох-електродну комірку ST2558B-F01, що містила чотири контакти, як зображено на Рис.1. Електропровідність захисних покриттів вимірювалась на постійному струмі [15]. Через два контакти проходить струм, а за допомогою інших двох вимірюється падіння напруги.

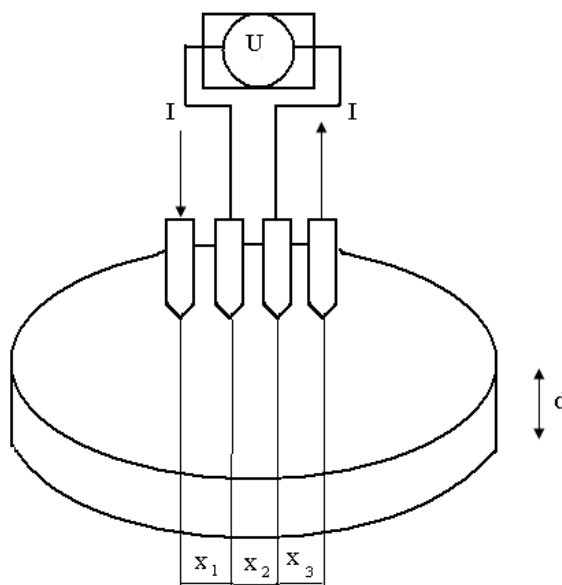


Рис.1. Схематичне зображення вимірювання опору зразка

Відповідно до теорії чотиризондового методу досліджувані зразки покриття можна вважати тонкими, так як має місце співвідношення $< 0,4$ між їх товщиною d і відстанню між електродами комірки (X_2), розташованих уздовж однієї лінії. У такому випадку згідно з цією теорією, питомий опір зразків може бути визначено за формулою:

$$\rho = \pi / \ln 2 (V / I) d = 4.532 (V / I) d,$$

де V -падіння напруги, I -сила струму, d - товщина покриття.

Згідно наведених в Табл.2 даних можна відмітити, що введення наноматеріалів має значний вплив на питомий опір покриття. Дещо кращі показники питомого опору одержанні для покриття навіть після введення неелектропровідних матеріалів, а саме оксиду нанозаліза та карбіду бору і кремнію. Це питання потребує подальшого дослідження. Можливо, наноматеріал покращує структурування електропровідних матеріалів в полімерній основі композиту. Як видно з наведених в Табл.2 даних, менший питомий опір мають покриття з такими наноматеріалами, як вуглецеві нанотрубки (за винятком зразку С100) та графен. Слід зазначити, що питомий опір покриття залежить від процесу диспергування наноматеріалів.

В даній роботі насамперед приділяється увага вуглець-полімерним захисним матеріалам. Відомо, що такі екрани мають складні співвідношення відбивальних та поглинальних властивостей [16], а їх визначення залежить від методів дослідження.

Таблиця 2

Характеристики захисних покриттів від ЕМВ з різними наноматеріалами

№ п/п	Наноматеріал	Екранування, дБ	Питомий опір, Ом·см
Композиційний склад: 16,67* сажа Pure Black; 50* графіт КГП С-1; 16,67 наноматеріал; 16,67 полівінілбутираль			
1	B ₄ C(1/0)	-18,0	0,33
2	B ₄ C(10/5)	-20,0	0,22
3	B ₄ C(20/7)	-20,5	0,27
4	B ₆ O №8,9/1	-18,6	0,64
5	нанозаліза оксид Fe-1	-21,5	0,20
6	нанозаліза оксид Fe-2	-19,7	0,40
7	нанозаліза оксид Fe-3	-19,2	0,41
Композиційний склад: 22,22 сажа Pure Black; 55,56 графіту ГАК-1; 2,22 наноматеріал; 20 полівінілбутираль			
8	графен G250-Н	-21,7	0,27
9	графен 1000-Н	-23,0	0,18
Композиційний склад фарби: 20 сажа Pure Black; 50 графіт КГП С-1; 10 наноматеріал; 20 полівінілбутираль			
10	графен xGnP-C-750	-20,4	0,32
11	Вуглецеві нанотрубки С100	-7,4	1,47
12	Вуглецеві нанотрубки 150 Р	-18,6	0,28

* - цифри відображають вміст матеріалу в масових відсотках

В роботі був використаний стандартизований і широко використовуваний метод вимірювання ефективності екранування матеріалів тонких зразків (до 2 мм). Суть цього методу полягає у використанні векторного аналізатора електричних ланцюгів і компактних

ТЕМ-комірок (Transversal ElectroMagnetic Cell). Методику вимірювання регламентують два стандарти: ASTM ES7 [17] і ASTM D4935. Слід відмітити, що стандарт ASTM ES7-83 був основою вказаного метода. ТЕМ-комірки, відповідають вимогам цього стандарту, мають безперервний провідник, а тестований зразок повинен бути круглої форми з круглим отвором в центрі. На сьогоднішній день за цим стандартом розроблена велика кількість моделей ТЕМ-комірок, що дозволяють проводити вимірювання в діапазоні до 3 ГГц. Пізніше був прийнятий інший стандарт: ASTM D4935-99, який перевидавався в 2010 і 2018 роках і є чинним в даний час. Особливість стандарту в тому, що ТЕМ-комірки мають поперечний розріз, в якому закріплюється тестований зразок. Зразок може бути круглої або прямокутної форми, в залежності від форми поперечного перерізу ТЕМ-комірки. Незважаючи на кілька редакцій документа ASTM D4935, він стандартизує досить вузький діапазон частот: від 30 МГц до 1,5 ГГц. Пов'язано це з тим, що в ТЕМ-комірках, що мають конструкцію описану в стандарті, з ростом частоти спостерігаються різні паразитні процеси, які унеможливають точні вимірювання ефективності екранування. У роботі нами використані удосконалені ТЕМ-комірки (Рис.2) компанії KEYCOM Corp. (Японія). Компанії KEYCOM Corp. вдалося шляхом модифікації конструкцій ТЕМ-комірки розширити частотний діапазон до 18 ГГц.

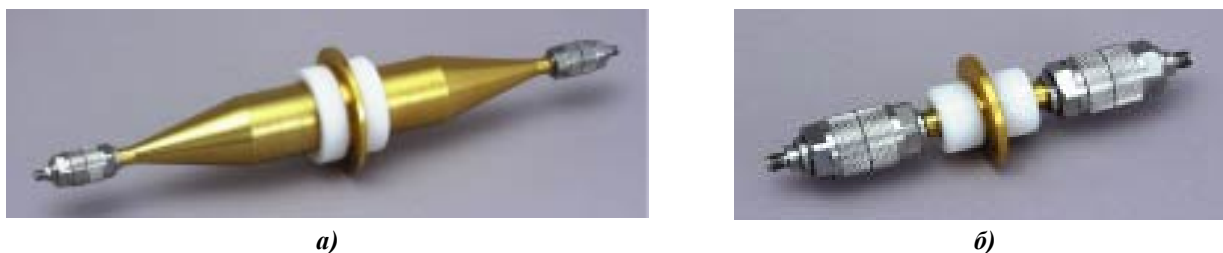


Рис.2. ТЕМ-комірки компанії KEYCOM Corp. (Японія): а) ТЕМ- комірка для проведення вимірювання в діапазоні частот 45 МГц- 3 ГГц відповідно до стандарту ASTM D4935, б): ТЕМ- комірка для проведення вимірювання в діапазоні частот 500 МГц 18 ГГц відповідно до стандартів ASTM D4935 та ASTM ES7

Вимірювальний комплекс базується на векторному аналізаторі Anritsu MS46122A-020. Цей векторний аналізатор працює в частотному діапазоні від 1 МГц до 20 ГГц і забезпечує динамічний діапазон більше 100 дБ. Структурна схема підключення ТЕМ-комірки до векторного аналізатора показана на Рис.3. Тестований зразок круглої форми затискається між двома половинами ТЕМ-комірки.

Для управління векторним аналізатором і розрахунку ефективності екранування матеріалів використане спеціалізоване програмне забезпечення DMP-11 компанії KEYCOM Corp. Основні завдання програми DMP-11 полягають в управлінні векторним аналізатором ланцюгів, реєстрації результатів вимірювань та первинної обробки результатів за спеціальними формулами, що враховують параметри використовуваної ТЕМ-комірки.

Ефективність екранування матеріалу була досліджена шляхом вимірювання рівня передачі сигналу на еталонному та досліджуваному зразках та розрахована як різниця передачі сигналу між ними. Еталонні та досліджувані зразки бути з одного матеріалу і товщини. Такий метод забезпечує високу точність результатів вимірювань. Типова частотна залежність ефективності екранування покриття наведена на Рис.4.

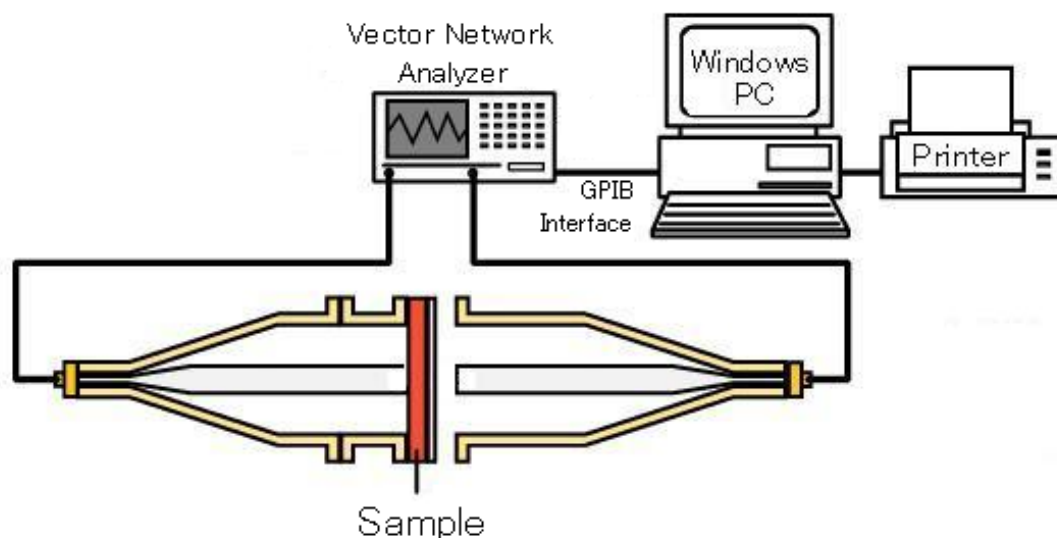


Рис.3. Структурна схема підключення ТЕМ-комірки до векторного аналізатора
(<https://www.keycom.co.jp/eproducts/sem/sem01/page.html>)

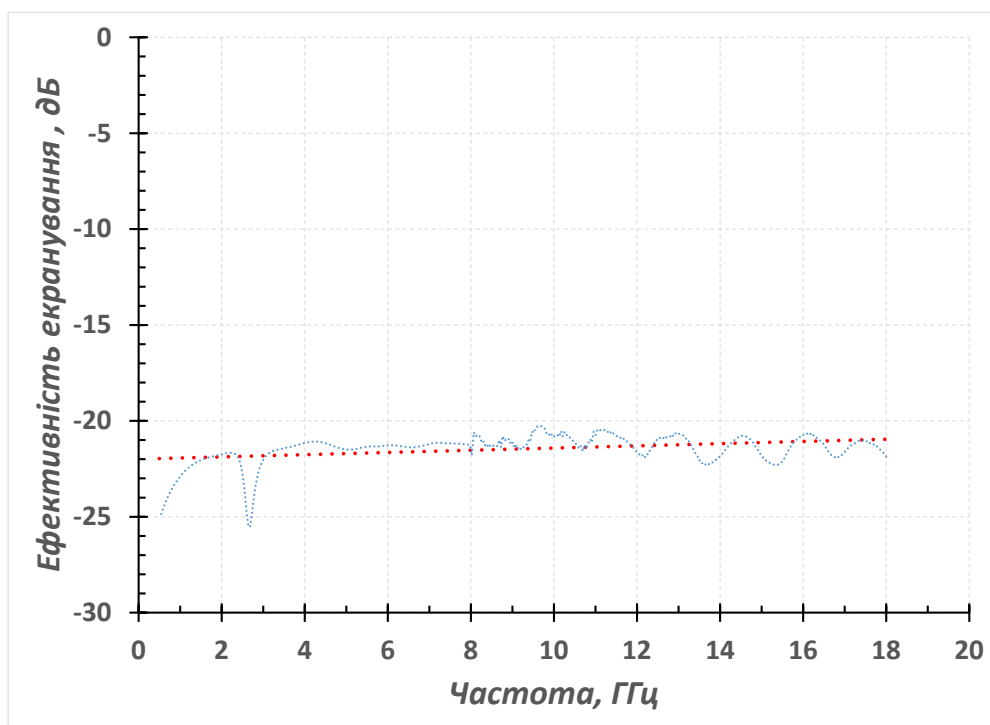


Рис.4. Частотна залежність ефективності екранування покриття, що містив 16,67% графітیزованої сажі, 50% графіту КГП С-1 та 16,67% наночастинок оксиду заліза та 16,67 % ПВБ

Ефективність екранування несуттєво змінюється в діапазоні частот до 18 ГГц. Для спрощення аналізу результатів вимірювання були розраховані узагальнені середні значення ефективності екранування в діапазоні частот 500 МГц до 18 ГГц. Одержані результати наведені в Табл. 2.

Аналіз результатів досліджень вказує на цілком високу ефективність запропонованих покриттів при частотах до 18 ГГц. Розроблені матеріали забезпечують ефективність екранування на рівні 15 – 30 дБ.

Отже одержані матеріали можуть бути успішно використані для виготовлення захисних покриттів та екранів необхідних для захисту людини від шкідливого впливу електромагнітного поля радіохвиль. Значення ефективності екранування вказує на незначний вплив наночастинок кремнію та бору на захисні властивості. Найбільш ефективним покриттям є композитні матеріали, що містили оксид нанозаліза, вуглецеві нанотрубки та графен. Не виникає сумніву щодо факту, що високу ефективність екранування ЕМВ мають покриття, що містять наноматеріали. Перспективним, на наш погляд, є пошук можливостей враховувати не тільки ваговий вміст вуглецевих та нанорозмірних матеріалів у полімерній основі, а й особливості їх просторового розподілу у матеріалі. Наноматеріали можуть мати високу ефективність заповнення композитного матеріалу. Це дає змогу створювати нові ефективні композитні матеріали для захисту від впливу електромагнітного випромінювання.

Висновки. Ефективність екранування залежить від хвильового опору розповсюдження хвилі та хвильового опору матеріалу захисного покриття. Тому для підвищення ефективності захисного покриття від впливу електромагнітного випромінювання слід використовувати композитні матеріали з найменшим питомим опором. Встановлено, що застосування в якості наповнювачів неелектропровідних матеріалів, а саме оксиду нанозаліза та карбіду бору і кремнію зменшує в 2-3 рази питомий опір композитного покриття. Вказані матеріали покращують структурування електропровідних матеріалів в полімерній основі композиту. Однак, не встановлений вплив природи та складу сполук бору та кремнію на електрофізичні характеристики композитів. Найменший питомий опір мають покриття на основі вуглецевих наноматеріалів - вуглецеві нанотрубки та графен. Використання даних матеріалів у композитних покриттях дає змогу підвищити ефективність екранування до 30 дБ на частотах до 18 ГГц.

Подяка. Автори вдячні к.т.н. Олександру Боримському (Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ) і доценту Олені Корчугановій (Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Сєвєродонецьк) за представлені зразки наноматеріалів, а також МОН України (держбюджетна тема 16.02.48 ДБ) і програмі НАТО «Наука заради миру» за фінансову підтримку досліджень в рамках проекту SpS G5477.

Література

1. Sukach, S., Riznik, D., Zachepa, N., Chencheyov, V. (2020). Normalization of the Magnetic Fields of Electrical Equipment in Case of Unauthorized Influence on Critical Information Infrastructure Facilities. *Soft Target Protection*, 337–349. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1755-5_28
2. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>.
3. S. Taccola, F. Greco, A. Zucca et al, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5 6324 (2013).
4. T.K. Mahto, A.R. Chowdhuri, S.K. Sahu, J

References

1. Sukach, S., Riznik, D., Zachepa, N., Chencheyov, V. (2020). Normalization of the Magnetic Fields of Electrical Equipment in Case of Unauthorized Influence on Critical Information Infrastructure Facilities. *Soft Target Protection*, 337-349. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1755-5_28
2. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>.
3. S. Taccola, F. Greco, A. Zucca. (2013). *ACS Appl. Mater. Interfaces*, (5) 6324.
4. T.K. Mahto, A.R. Chowdhuri, S.K. Sahu. (2014). *J Appl. Polym. Sci.*, 131 40840.
5. Hitoshi Sakamoto, Sho Igarashi, Kazuma Niume,

Appl. Polym. Sci., 131 40840 (2014).
5. Hitoshi Sakamoto, Sho Igarashi, Kazuma Niume, Masayuki Nagai, Organic Electronics, 12 1247 (2011).
6. Peichao Lian, Xuefeng Zhu, Shuzhao Liang, Zhong Li, Weishen Yang, Haihui Wang, Electrochimica Acta, 56 4532 (2011).
7. T.T. Tung, J.F. Feller, T. Kim et al, J Polym. Sci. Part A: Polym. Chem. 50 927 (2012).
8. J. W. Liu, J. Cheng, R. C. Che, J. J. Xu, M. M. Liu, Z.W. Liu, J. Phys. Chem. C 117 489 (2013).
9. J. Deng, C. He, Y. Peng et al, Synth. Met. 139 295 (2003).
10. M. Park, J. Cheng, J. Choi et al, Colloids Surf. B Biointerfaces, 102 238 (2013).
11. M. Khairy, Synth. Met. 189 34 (2014).
12. I. B. Сеник, В. З. Барсуков, І. В. Короташ, О. А. Крюкова. Вплив різних вугле-графітових добавок на характер електромагнітних втрат полімерних композитів // Вісник КНУТД. – 2016. № 2. с. 183-188.
13. Барсуков В.З., Сеник І.В., Хоменко В.Г., Савченко Б.М., Крюкова О.А. Композиція для формування композиційного матеріалу для захисту від ЕМВ та спосіб одержання композиційного матеріалу на субстраті, Патент України на винахід, №117949, 2018.
14. Kamila Abuzarova and Olena Korchuganova 2020. Nanosized Iron Oxyhydroxide: Properties, Application, Preparation. J. Phys.: Conf. Ser. 1534 012002
15. Lushcheykin G.A. Methods for studying the electrical properties of polymers. Moscow: Publishing house chemistry.-1988.-P.19-21
16. Козловський В.В., Софієнко І.І. Екранирующие свойства современных материалов // Вісник ДУІКТ, 7(3), 2009. – С. 233–245.
17. ASTM-ES7, Test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials, ASTM, 1983.

Masayuki Nagai. (2011). Organic Electronics. 12 1247.
6. Peichao Lian, Xuefeng Zhu, Shuzhao Liang, Zhong Li, Weishen Yang, Haihui Wang. (2011). Electrochimica Acta. 56 4532.
7. T.T. Tung, J.F. Feller, T. Kim. (2012). J Polym. Sci. Part A: Polym. Chem. 50 927.
8. J. W. Liu, J. Cheng, R. C. Che, J. J. Xu, M. M. Liu, Z.W. Liu. (2013). J. Phys. Chem. 117 489.
9. J. Deng, C. He, Y. Peng. (2003). Synth. Met. 139 295.
10. M. Park, J. Cheng, J. Choi. (2013). Colloids Surf. B Biointerfaces. 102 238.
11. M. Khairy. (2014). Synth. Met. (189), 34.
12. I. V. Senyk, V. Z. Barsukov, I. V. Korotash, O. A. Kriukova. (2016). Vplyv riznykh vuhle-hrafitovykh dobavok na kharakter elektromahnitnykh vtrat polimernykh kompozytiv [Influence of various carbon-graphite additives on the nature of electromagnetic losses of polymer composites]. Visnyk KNUVD, (2), 183-188. [in Ukrainian].
13. Barsukov V.Z., Senyk I.V., Khomenko V.H., Savchenko B.M., Kriukova O.A. (2018). Kompozytsiia dlia formuvannia kompozytsiinoho materialu dlia zakhystu vid EMV ta sposib oderzhannia kompozytsiinoho materialu na substrati [Composition for forming a composite material for protection against EMP and method for producing a composite material on a substrate]. Patent of Ukraine for invention №117949 [in Ukrainian].
14. Abuzarova K., Korchuganova O. (2020). Nanosized Iron Oxyhydroxide: Properties, Application, Preparation. J. Phys.: Conf. Ser. 1534 012002
15. Lushcheykin G.A. (1988). Methods for studying the electrical properties of polymers. Moscow: Publishing house chemistry. 19-21.
16. Kozlovskiy V.V., Sofienko I.I. (2009). Ekraniruyushchie svoystva sovremennykh materialov. [Shielding properties of modern materials]. Visnik DUKT, 7(3). 233–245. [in Russian].
17. ASTM-ES7. (1983). Test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials, ASTM.

CHERNYSH OKSANA

Scopus Author ID: 56818919300
orcid.org/0000-0002-9402-1595

ResearcherID: X-2552-2018; chernish.ov@knuvd.edu.ua
Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry
Kyiv National University of Technologies and Design

BUTENKO OKSANA

Scopus Author ID: 57207988484
orcid.org/0000-0002-4513-3355

ResearcherID: AAH-4024-2019; butenko@bigmir.net
Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry
Kyiv National University of Technologies and Design

TVERDOHLIB VIKTOR

orcid.org/0000-0002-5764-9842

tverdoxlib.vs@knutd.edu.ua

Dpatment of Electrochemical PowerEngineering and
Chemistry

Kyiv National University of Technologies and Design

KHOMENKO VOLODYMYR

Scopus Author ID: 7004402598

orcid.org/0000-0003-0013-8010

ResearcherID: X-2214-2018; v.khomenko@i.ua

Dpatment of Electrochemical PowerEngineering and
Chemistry

Kyiv National University of Technologies and Design

BARSUKOV VIACHESLAV

Scopus Author ID: 8590938100

orcid.org/0000-0002-3041-2474ResearcherID: O-6308-2017; v-barsukov@i.ua,

Dpatment of Electrochemical PowerEngineering and Chemistry, Kyiv National University of Technologies and Design

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТАМИ

БУТЕНКО О. А., ЧЕРНЫШ О.В.,

ХОМЕНКО В. Г., ТВЕРДОХЛЕБ В.С., БАРСУКОВ В. З.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Использование наноматериалов в качестве композиционного материала для повышения эффективности защитного покрытия от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ).

Методика. Исследования образцов проводили с помощью оборудования компании Keusot Corp. (Япония), разработанного для измерения экранирующих свойств материалов. Ультразвуковое диспергирование наноматериалов было выполнено с помощью ультразвукового диспергатора УЗДН-A1200T. Удельное сопротивление композитных покрытий измерено с использованием стандартизированной 4-х электродной ячейки ST2558B-F01 для измерения электропроводности материалов.

Результаты. Установлено влияние различных наноматериалов на защитные свойства тонких углерод-полимерных покрытий. Исследованы следующие наноматериалы: оксид и карбид бора, оксида наножелеза, углеродные нанотрубки и графен. Установлена зависимость удельного сопротивления покрытия и эффективности экранирования от типа наноматериала в композитном образце. Экспериментально доказано, что методика приготовления краски с использованием ультразвукового диспергирования может в 2,5 раза улучшить защиту от ЭМИ. Установлено, что графен имеет незначительное преимущество в экранировании ЭМИ по сравнению с другими углеродными материалами. Полученные результаты указывают на то, что неэлектропроводные материалы, такие как оксиды наножелеза, бора и карбид бора, могут быть достаточно эффективными для создания радиопоглощающих композитных материалов.

Научная новизна. В работе предлагается новый подход получения тонких защитных покрытий от ЭМИ с использованием таких наноматериалов как карбид бора, оксид бора, оксид наножелеза, некоторых типов углеродных нанотрубок и графена. В работе предложен уникальный алгоритм ультразвукового диспергирования наноматериалов для изготовления композитных материалов. Впервые проведен анализ радиопоглощающих свойств покрытий на основе отечественных материалов с использованием международных стандартизированных методов исследования.

Практическая значимость. Композиционные покрытия прежде всего могут применяться для защиты человека от электромагнитного излучения. Материалы могут найти широкое применение для решения проблем экранирования помещений, оборудования, в военной и медицинской отраслях.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, наноматериалы радиоэкранирующие композиционные материалы, защитные покрытия.

FEATURES OF THE INFLUENCE OF NANOMATERIALS ON SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY COMPOSITES

BUTENKO O.O., CHERNYSH O.V.,
KHOMENKO V.G., TVERDOKHLIB V.S., BARSUKOV V.Z.
Kyiv National University of Technologies and Design

Goal. The use of nanomaterials as a composite material to improve the efficiency of a protective coating for shielding against electromagnetic interference.

Methodology. Samples were studied using equipment from Keycom Corp. (Japan) developed for measuring the shielding effect. Ultrasonic dispersion of nanomaterials was performed using a UZDN-A1200T ultrasonic disperser. The resistivity of the composite coatings was measured using a ST2558B-F01 standardized 4-electrode cell.

Results. The influence of various nanomaterials on the protective properties of thin carbon-polymer coatings has been established. The following nanomaterials have been investigated: boron oxide and carbide, iron oxide, carbon nanotubes, and graphene. The dependence of the resistivity of the coating and the shielding effect on the type of nanomaterial in the composite sample has been established. It has been experimentally proved that the ultrasonic dispersion can improve the shielding effect by 2.5 times. It has been found that graphene has a slight advantage compared to other carbon materials. Also, our results have been established that non-conductive materials such as nano-oxides of iron, boron, and boron carbide can be quite effective for creating radio-absorbing composite materials.

Scientific novelty. The paper proposes a new approach to obtain thin protective coatings against electromagnetic radiation using nanomaterials such as boron carbide, boron oxide, iron oxide, some types of carbon nanotubes, and graphene. The paper proposes a unique algorithm for the ultrasonic dispersion of nanomaterials for the manufacture of composite materials. For the first time, an analysis of the shielding effect of coatings based on domestic materials using international standardized research methods has been carried out.

Practical significance. Composite coatings can primarily be used to protect humans from electromagnetic radiation. The materials can be widely used to solve the problems of shielding premises, equipment, in the military, and medical industries.

Key words: electromagnetic radiation, nanomaterials, radio-screened composite materials, protective coatings.

УДК 615.453.:
615.281.9:615.072

САЛІЙ О.О.¹, КУРИШКО Г. Г.¹, ОГЕРЕНКО З.О.¹,
ГЕТАЛО О. В.²

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Київський міжнародний університет

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛІВ ВИВІЛЬНЕННЯ ДОКСИЦИКЛІНУ ХІКЛАТУ З ТВЕРДИХ ЖЕЛАТИНОВИХ КАПСУЛ ПРИ ЗМІНІ ВИРОБНИКІВ ДІЮЧОЇ РЕЧОВИНИ

Мета. Проведення порівняльних досліджень профілів вивільнення доксицикліну хіклату з твердих желатинових капсул, виготовлених з діючою речовиною альтернативних виробників.

Методика. Об'єктом дослідження є зразки лікарського засобу доксицикліну хіклату у формі твердих желатинових капсул, виготовлених з АФІ виробника «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd», Китай та альтернативного виробника «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd», Китай. Дослідження профілів вивільнення діючої речовини з лікарського засобу проводили використовуючи «Прилад з лопаттю». Кількість вивільненої речовини визначали методом абсорбційної спектрофотометрії.

Результати. Досліджено лікарський засіб у твердих желатинових капсулах по 100 мг на основі субстанції доксицикліну хіклату двох виробників «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd», Китай, та «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd», Китай. Встановлено, що за профілем домішок та результатами показників якості субстанції доксицикліну хіклату досліджуваних виробників є альтернативними та взаємозамінними. Для підтвердження подібності профілів розчинення Доксициклін, капсули по 100 мг проводили випробування відповідно до вимог ДФУ, 2.9.3. Тест «Розчинення», з використанням буферних розчинів при трьох значеннях рН: рН 1,2 (0,1 М НСІ), рН 4,6 (ацетатний буфер) і рН 6,8 (фосфатний фізіологічний буфер). Проведені порівняльні дослідження *in vitro* для двох серій лікарського засобу встановили подібність кінетики вивільнення діючої речовини. Розраховані значення коефіцієнту подібності становлять: $f_2=78,4$ для розчину з рН=1,2; $f_2=82,7$ для розчину з рН=4,6 та $f_2=75,8$ для розчину з рН=6,8. Відповідно до досліджень у трьох буферних розчинах, коефіцієнту подібності знаходиться в межах від 50 до 100, що дозволяє зробити висновок про альтернативність та можливість застосування досліджених виробників АФІ для забезпечення виробництва лікарського засобу доксицикліну хіклату у твердих желатинових капсулах по 100 мг. Відносно стандартне відхилення середнього значення (RSD) ступеня вивільнення складає менше 20% в першій точці контролю і не більше 10%, починаючи з другої і до останньої точки контролю і свідчить, що-результати є дійсні.

Наукова новизна. Доведено, що дослідження профілів розчинення твердих лікарських форм *in vitro* надають можливість оцінити ризики застосування АФІ, синтезованого різними фірмами-виробниками

Практична значимість. Отримані результати експерименту дозволяють виробниками готових лікарських засобів обґрунтовано застосовувати альтернативних виробників сировини для забезпечення безперебійного промислового виробництва та задоволення попиту ринку.

Ключові слова: доксицикліну хіклат, тверді желатинові капсули, тест «Розчинення», коефіцієнт подібності.

Вступ. В даний час глобальне зростання резистентності збудників до широко використовуваних антибіотиків вимагає повернення до практики використання деяких класичних препаратів із збереженою активністю за відповідними показниками [1]. Доксициклін - бактеріостатичний антибіотик широкого спектру дії, який застосовується для лікування різних інфекційних захворювань, в основному для лікування інфекцій сечовивідних, дихальних шляхів та шлунково-кишкового тракту [2]. За багатьма показаннями доксициклін може бути обраний з лінійки антибіотиків, доступних для пацієнтів [3]. Доксициклін є препаратом першого вибору при кліщових захворюваннях, як

хвороба Лайма, для риккетсійних інфекцій [4]. У періоди спалаху та розповсюдження коронавірусної хвороби COVID-19 для початку терапії лікування пневмонії пероральним антибіотиком першого вибору рекомендован доксициклін, оскільки він має більш широкий спектр дії, ніж амоксицилін, особливо проти *Mycoplasma pneumoniae* та *Staphylococcus aureus*, які є вторинними бактеріальними причинами пневмонії під час пандемії COVID-19 [5].

Протягом останніх років спостерігався дефіцит доступності субстанції доксицикліну хіклату, що викликаний з однієї сторони зростанням попиту, оскільки тетрациклін стає менш доступним, з іншої - проблемами при виробництві АФІ доксицикліну, пов'язаними з технологічними параметрами, утворенням домішок, дослідженнями профілю домішок, частих внесень змін у монографії провідних фармакопей на АФІ «Doxycycline hyclate», тощо [6]. Для отримання доксицикліну запропоновано декілька шляхів хімічного синтезу, але вони, як правило, не доступні в комерційних кількостях завдяки хімічній чутливості молекули, її лабільності в кислих та лужних середовищах [7]. Збільшення попиту у поєднанні з нестачею сировини для доксицикліну та припиненням виробництва АФІ кількох виробників, таких як Teva Pharmaceuticals, спричинило коливання цін на ринку та відсутність прогнозу у забезпеченні готовими лікарськими засобами [8].

Різні форми солей доксицикліну працюють, блокуючи синтез білка, який перешкоджає росту бактерій. Доксицикліну хіклат і моногідрат однаково терапевтично ефективні. Доксицикліну моногідрат та доксицикліну хіклат відрізняються лише формою солі - моногідратом та хіклатом. Хіклат має більшу розчинність, ніж моногідрат, але моногідратна форма може краще переноситися. Однак різні форми солей та рекомендації щодо дозування можуть викликати плутанину у постачальників та у фармацевтичних виробників готових лікарських засобів доксицикліну. Тому при заміні постачальників діючої речовини потрібне обґрунтоване погодження та перевірка методів отримання АФІ [9].

Асортимент лікарських засобів, що містять доксициклін у формі твердих желатинових капсулах на українському ринку, у більшості виробників представлено у сольовій формі хіклату. Для забезпечення попиту ринку у препараті та безперебійного промислового виробництва доксицикліну у формі твердих желатинових капсул існує необхідність застосування альтернативних виробників АФІ та забезпечення якості і відтворюваності від серії до серії готового лікарського засобу. Вивчення профілів розчинення твердих лікарських форм *in vitro* надає можливість оцінити, наскільки буде критичним застосування АФІ, синтезованого різними фірмами-виробниками [10]. Для гарантії підтвердження якості і терапевтичної ефективності препарату проводять порівняльні дослідження *in vitro* для препарату порівняння і лабораторної, дослідно-промислової та виробничої серій капсул [11]. Саме оцінка і підтвердження схем синтезу, профілю домішок, сольової форми та кінетики вивільнення субстанції доксицикліну мають бути доведені виробниками готових лікарських засобів при заміні сировини у виробництві та забезпечення гарантованої ефективності препарату.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення порівняльних досліджень профілів вивільнення доксицикліну хіклату з твердих желатинових капсул, виготовлених з діючою речовиною альтернативних виробників.

Матеріали та методи дослідження. Матеріалом досліджень були зразки серій лікарського засобу доксицикліну хіклату у формі твердих желатинових капсул, виготовленого з АФІ затвердженого виробника фірми "Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd", Китай та альтернативного виробника "Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd", Китай. За своїми фізико-хімічними характеристиками зразки АФІ повністю відповідають вимогам монографії Європейської фармакопеї та являть собою жовтий, кристалічний гігроскопічний порошок, легко розчинний у воді та метанолі, помірно розчинний у 96% спирті, у розчинах лугів та карбонатів [12].

Дослідження профілів вивільнення діючої речовини затвердженого та альтернативного виробників АФІ проводили відповідно до вимог ДФУ, 2.9.3. Тест «Розчинення» для твердих дозованих форм за наступних умов:

- Тип приладу: прилад з лопаттю;
- об'єм середовища розчинення: 900 мл;
- температура розчинення: $37,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- середовища розчинення: буферні розчини з рН 1,2 (0,1 М HCl), рН 4,6 (ацетатний буфер) и рН 6,8 (фосфатний буфер);
- швидкість обертання лопаті: 75 об/хв.;
- час відбору проб: 15 хв., 30 хв., 45 хв.

Для випробування в камеру для розчинення поміщали 1 капсулу лікарського засобу. Кількісний вміст доксицикліну, вивільненого в буферний розчин, визначали методом абсорбційної спектрофотометрії в ультрафіолетовій області при максимумі довжині хвилі 267 нм відповідно до вимог ДФУ 2.2.25. Розчин порівняння готували шляхом розчинення стандартного зразку доксицикліну хіклату EP CRS (Catalogue code: D3000000) у відповідному середовищі розчинення.

Результати проведених досліджень виражали у відсотках від номінального вмісту доксицикліну хіклату в одиниці лікарського засобу. Фактор подібності (f_2) кінетики розчинення діючої речовини розраховували математично для демонстрації та обговорення профілів подібності лікарських засобів [13].

Результати дослідження. Встановлено, що в Україні певний час для виробництва готових лікарських засобів використовувались субстанції виробників «Yangzhou Pharmaceutical Factory», Китай та «Yangzhou Winsome ABA Pharmacy Co., Ltd», Китай, але дані виробники обмежують поставки та пропонують певні умови для співробітництва, зокрема збільшення об'ємів замовлення, збільшення цінової політики, тощо. Визначено, що в Україні станом на 2020 р. зареєстровані субстанції доксицикліну хіклату виробників «Yangzhou Liberty Pharamceutical Co. Ltd.», Китай, «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd» Китай, та «Hebei Jiupeng Pharmaceutica Co., Ltd.», Китай. Для порівняння з затвердженим виробником «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd» нами обрано зразок субстанції доксицикліну хіклату альтернативного виробника «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd», Китай, який спеціалізується на синтезі антибіотиків тетрациклінового ряду, макролідів, а субстанція доксицикліну хіклат є основним продуктом виробництва.

Встановлено, що промисловий підхід для одержання доксицикліну заснований на хімічних модифікаціях ферментаційних тетрациклінів - окситетрацикліну або метацикліну. Обидва виробники застосовують метациклін як основний вихідний матеріал для отримання

доксидцикліну хіклату. Також у схемах синтезу використовуються однакові органічні розчинники, тому субстанції обох фірм-виробників мають однаковий залишкових органічних розчинників та профіль домішок (Табл. 1).

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз показників якості доксидцикліну хіклату альтернативних виробників

Показник	Вимоги специфікації	Результати контролю діючих речовин	
		Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd	Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd
Опис	Жовтий кристалічний порошок, гігроскопічний	Відповідає	Відповідає
Розчинність	Легко розчинний у воді Р і метанолі Р, помірно розчинний у етанолі (96%). Розчиняється у розчинах гідроксидів і карбонатів лужних металів	Відповідає	Відповідає
рН	Від 2.0 до 3.0	2,3	2,5
Питоме оптичне обертання	Від — 120 до — 105, у перерахунку на безводну вільну від етанолу речовину	— 112	— 110
Питомий показник поглинання	Від 300 до 355, у перерахунку на безводну вільну від етанолу речовину	321	324
Важкі метали	Не більше 0.005% (50 ppm)	< 50ppm	<50ppm
Світло-поглинальні домішки	Оптична густина, виміряна за довжини хвилі 490 нм, має бути не більше 0.07 у перерахунку на безводну вільну від етанолу речовину	0,02	0,03
Супровідні домішки	6-епідоксидцикліну – не більше 2.0% Метацикліну – не більше 2.0% Окситетрацикліну – не більше 0,5 % 4-епідоксидцикліну – не більше 0.5% 4,6-епідоксидцикліну – не більше 0.5% Домішки F - не більше 0.5% Будь-якої іншої домішки – 0.1%	1,55 0,27 0,04 0,02 не виявлено 0,22 0,01	1,45 0,47 не виявлено 0,02 не виявлено 0,31 не виявлено
Етанол	Від 4,3% до 6,0%	4,9%	5,4%
Вода	Від 1,4% до 2,8%	2,3%	1,9%
Сульфатна зола	Менше 0,4%	< 0,4%	< 0,4%
Кількісне визначення	Не менше 95% та не більше 102% $C_{22}H_{25}ClN_2O_8$ у перерахунку на безводну вільну від етанолу речовину	98,4	99,0
Залишкові кількості органічних розчинників	—	Метанол – не більше 0.5%	Метанол – не більше 0.5%

Як видно з табл. 1 до субстанцій обох виробників виставлені однакові вимоги щодо критерію якості. Експериментально визначено, що за результатами контролю показників якості та профілем домішок субстанції доксидцикліну хіклату досліджуваних виробників є альтернативними.

Доксициклін хіклат відноситься до 1 класу БСК (речовини з високою розчинністю і високим ступенем проникнення), та характеризується як дуже швидко розчинна або швидко розчинна речовина, але описані ризики, що деякі складні тверді форми негайного вивільнення з доксицикліну хіклатом можуть розчинятися занадто повільно за рахунок вмісту різних допоміжних речовин або застосовуються різні методи виробництва [6].

Для підтвердження подібності профілів розчинення досліджували зразки Доксицикліну хіклат, капсули по 100 мг серії 001, виготовлена з АФІ затвердженого виробника «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd», та серії 002, виготовлена з АФІ альтернативного виробника «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd», та проводили випробування розчинів при трьох значеннях pH: pH 1,2 (0,1 М HCl), pH 4,6 (ацетатний буфер) і pH 6,8 (фосфатний фізіологічний буфер). У таблиці 2 представлено результати у статистичному вигляді ступінь вивільнення доксицикліну хіклату у трьох буферних середовищах з pH 1,2, 4,5 та 6,8 для 12 капсул зразків затвердженого виробника та 12 капсул зразків препарату з альтернативного виробника.

Таблиця 2.

Ступінь вивільнення (%) доксицикліну хіклату у середовищах розчинення для 2-х серій лікарського засобу

	15 хв		30 хв		45 хв		f ₂
	Серія 001 X, %	Серія 002 X, %	Серія 001 X, %	Серія 002 X, %	Серія 001 X, %	Серія 002 X, %	
0,1 М HCl	64	74	95	93	99	98	78,4
	69	69	98	94	104	99	
	61	75	93	99	97	101	
	62	71	91	91	102	93	
	72	72	90	92	101	98	
	73	73	95	95	104	95	
	68	68	96	90	100	97	
	73	73	97	97	98	95	
	65	76	98	95	99	98	
	70	72	96	96	102	99	
	74	74	100	97	98	99	
	73	77	99	93	103	99	
Х _{ср} , %	68,7	72,8	95,7	94,3	100,6	97,6	82,7
RSD	4,6	2,7	3,1	2,7	2,5	2,2	
pH 4,5	64	71	91	97	99	103	
	65	69	93	94	97	99	
	61	70	93	99	97	102	
	62	71	92	96	100	95	
	72	72	94	92	99	98	
	73	67	93	95	98	95	
	68	67	96	95	100	97	
	69	69	93	97	97	100	
	65	76	95	95	99	98	
	70	72	96	96	100	99	
	66	75	99	97	98	102	
	65	69	98	98	95	103	
Х _{ср} , %	66,7	70,7	94,4	95,9	98,2	99,3	
RSD	3,8	2,8	2,4	1,9	1,6	2,8	

Продовження таблиці 2

pH 6,8	54	51	81	77	96	93	75,8
	55	49	82	74	97	97	
	59	50	83	79	97	91	
	52	51	80	76	90	95	
	57	52	74	82	91	93	
	60	57	83	75	97	91	
	58	56	86	75	94	97	
	59	54	83	77	97	92	
	55	48	85	75	90	98	
	54	52	81	80	89	92	
	56	54	79	81	88	98	
	55	50	88	78	94	97	
Х _{ср} , %	56,2	52,0	82,1	77,4	93,3	94,5	
RSD	2,4	2,8	3,6	2,6	3,5	2,8	

Залежність ступеню вивільнення доксицикліну хіклату від часу розчинення у буферних розчинах з pH 1,2, 4,5 та 6,8 представлено на Рис. 1.

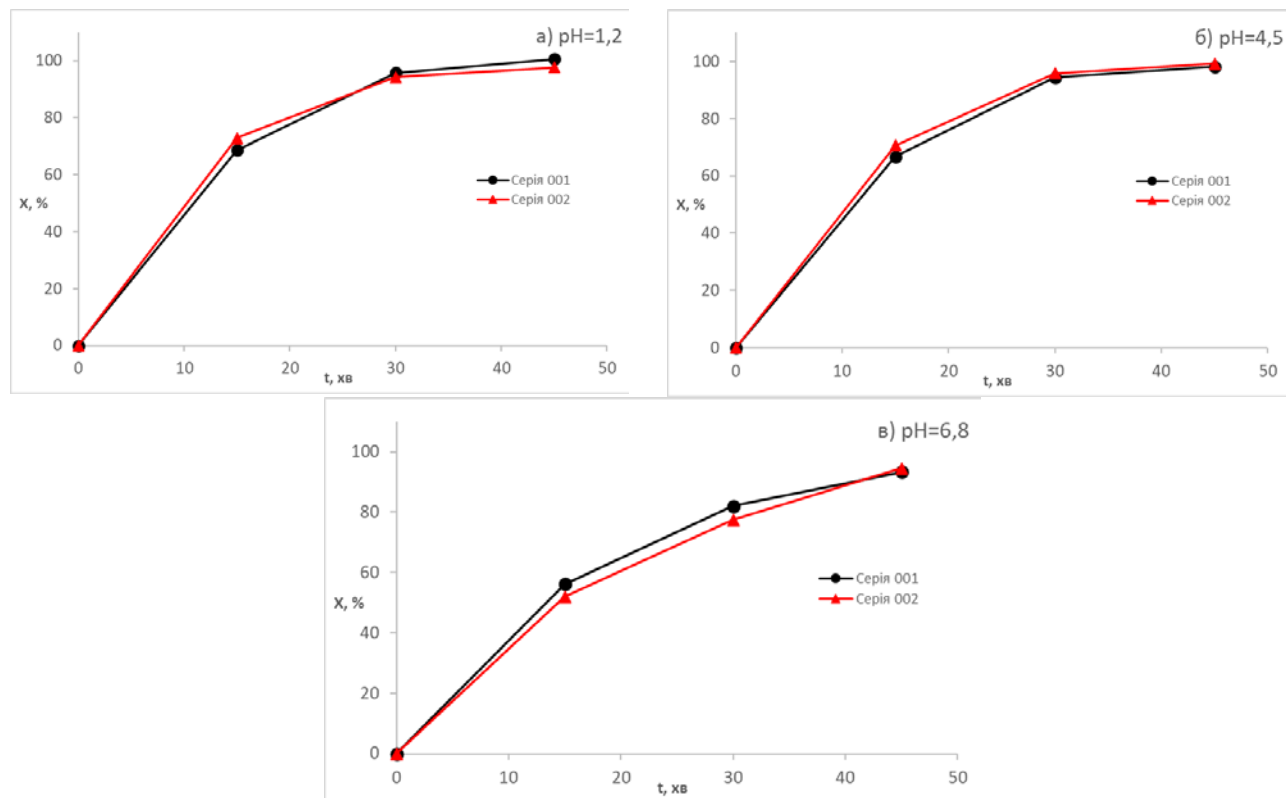


Рис. 1. Профілі розчинення доксицикліну хіклату з твердих желатинових капсул при pH середовища розчинення: а) 1,2; б) 4,5; в) 6,8

Як видно з отриманих експериментальних даних, розчинення діючої речовини у середовищах розчинення з pH 1,2 та 4,5 становить більше 85% за 30 хв. Отримані профілі розчинення капсул зразків затвердженого виробника та капсул зразків препарату з альтернативного виробника подібні в буферних розчинах з pH 1,2, 4,5 і 6,8. Відносне стандартне відхилення середнього значення (RSD) ступеня вивільнення складає менше 20%

в першій точці контролю і не більше 10%, починаючи з другої і до останньої точки контролю, що свідчить що результати є дійсними.

З даних табл. 2 для кожного середовища розчинення (буферний розчин з pH 1,2, 4,5 та 6,8) розраховано значення коефіцієнту подібності f_2 . Він становить 78,4, 82,7 та 75,8 відповідно та знаходиться в межах від 50 до 100, що свідчить про подібність кінетики вивільнення доксицикліну хіклату з двох серій лікарського засобу капсули 100 мг, виготовлених з АФІ виробників «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd» та «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd».

Результати експериментальних досліджень *in vitro* дозволяють зробити висновок, що серії лікарського засобу доксицикліну хіклат, капсули по 100 мг, виготовлені з АФІ досліджуваних виробників є взаємозамінними за показником «Розчинення».

Висновки. Досліджено діючу речовину доксицикліну хіклат двох виробників та встановлено що за результатами показників якості та профілем домішок субстанції доксицикліну хіклату досліджуваних виробників є альтернативними. Проведені порівняльні дослідження *in vitro* для двох серій лікарського засобу доксицикліну хіклат, капсули по 100 мг виготовлених з АФІ виробників «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd» та «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd» свідчать про подібність кінетики вивільнення діючої речовини. Відносне стандартне відхилення середнього значення (RSD) ступеня вивільнення складає менше 20% в першій точці контролю і не більше 10%, починаючи з другої і до останньої точки контролю, що свідчить що результати є дійсними.

Розраховані значення коефіцієнту подібності f_2 становить 78,4, 82,7 та 75,8 відповідно до досліджень у трьох буферних розчинах, знаходиться в межах від 50 до 100, і дозволяють зробити висновок про подібність кінетики вивільнення доксицикліну хіклату з двох серій лікарського засобу, альтернативність та можливість застосування досліджених виробників АФІ для забезпечення виробництва лікарського засобу.

Література

1. Ventola CL. The antibiotic resistance crisis: part 1: causes and threats. P T. 2015 Apr;40(4):277-83. PMID: 25859123; PMCID: PMC4378521.
2. Компендіум online [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://compendium.com.ua>
3. Holmes N.E., Charles P.G.P. Safety and efficacy review of doxycycline // Clin. Med. Ther., 1 (2009), pp. 471-482.
4. Purvis J.J. and Edwards M.S. (2000). Doxycycline use for rickettsial disease in pediatric patients. The Pediatric Infectious Disease Journal; 19:871-874.
5. COVID-19 rapid guideline: managing suspected or confirmed pneumonia in adults in the community (NG165). NICE guideline. Published: 3 April 2020/ www.nice.org.uk/guidance/ng165. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng165/resources/covid19-rapid-guideline-managing-suspected-or-confirmed-pneumonia-in-adults-in-the-community-pdf-66141902429125>.

References

1. Ventola CL. The antibiotic resistance crisis: part 1: causes and threats. P T. 2015 Apr;40(4):277-83. PMID: 25859123; PMCID: PMC4378521 [in English].
2. Kompendium online [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://compendium.com.ua> [in Ukrainian].
3. Holmes N.E., Charles P.G.P. Safety and efficacy review of doxycycline // Clin. Med. Ther., 1 (2009), pp. 471-482. [in English].
4. Purvis J.J. and Edwards M.S. (2000). Doxycycline use for rickettsial disease in pediatric patients. The Pediatric Infectious Disease Journal: 19:871-874 [in English].
5. COVID-19 rapid guideline: managing suspected or confirmed pneumonia in adults in the community (NG165). NICE guideline. Published: 3 April 2020/ www.nice.org.uk/guidance/ng165. [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng165/resources/covid19-rapid-guideline-managing-suspected-or-confirmed-pneumonia-in->

6. Jantratid, E., Strauch, S., Becker, C., Dressman, J., Amidon, G., Junginger, H., Kopp, S., Midha, K., Shah, V., Stavchansky, S. and Barends, D. (2010), Biowaiver monographs for immediate release solid oral dosage forms: Doxycycline hyclate. *Journal of pharmaceutical sciences*, 99: 1639-1653. doi:10.1002/jps.21954. 99. 1639-1653. 10.1002/jps.21954
7. Vardanyan R., Hruby V. Chapter 30 – Antibiotics. In: *Synthesis of Best-Seller Drugs*. Academic Press, 2016, Pages.573-643. doi:10.1016/B978-0-12-411492-0.00030-4
8. Nicole Gupta. When prescribing doxycycline, which form is best? / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://healthplans.providence.org/providers/news-and-events/provider-enews-archives/older-articles/when-prescribing-doxycycline-which-form-is-best/>
9. Gerardo Sison. Doxycycline Monohydrate vs Hyclate: Main Differences and Similarities [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.singlecare.com/blog/doxycycline-monohydrate-vs-hyclate>
10. Салій О.О., Куришко Г.Г., Огеренко З.О. (2020). Дослідження профілів розчинення для оцінки альтернативного виробника активного фармацевтичного інгредієнту у складі лікарського засобу. *Фармакоекономіка в Україні: стан та перспективи розвитку* : матеріали XII наук.-практ. INTERNET-конф., м.Харків, 22 травня 2020 р. 166-167.
11. Салій Е. А. Разработка технологии получения и масштабирование процесса производства капсул Рибавирина / Е. А. Салій, В. В. Литка, А. В. Лось // *Український біофармацевтичний журнал*. – 2010. – № 1 (6). – С. 4-9.
12. Доксицикліну хіклат // *Державна Фармакопея України / Державне підприємство «Науково-експертний фармакопейний центр»*. – 2-е вид. — Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2014. — Т. 2. — С. 214-216.
13. Дослідження біоеквівалентності. СТ-Н МОЗУ 42-7.1:2016 / ДП «Державний експертний центр Міністерства охорони здоров'я України». – 72с.
- adults-in-the-community -pdf-66141902429125 [in English].
6. Jantratid, E., Strauch, S., Becker, C., Dressman, J., Amidon, G., Junginger, H., Kopp, S., Midha, K., Shah, V., Stavchansky, S. and Barends, D. (2010). Biowaiver monographs for immediate release solid oral dosage forms: Doxycycline hyclate. *Journal of pharmaceutical sciences*, 99: 1639-1653. doi:10.1002/jps.21954. 99. 1639-1653. 10.1002 /jps.21954 [in English].
7. Vardanyan R., Hruby V. Chapter 30 – Antibiotics. In: *Synthesis of Best-Seller Drugs*. Academic Press, 2016, Pages.573-643. doi:10.1016/B978-0-12-411492-0.00030-4 [in English].
8. Nicole Gupta. When prescribing doxycycline, which form is best? / [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://healthplans.providence.org/providers/news-and-events/provider-enews-archives/older-articles/when-prescribing-doxycycline-which-form-is-best> [in English].
9. Gerardo Sison. Doxycycline Monohydrate vs Hyclate: Main Differences and Similarities [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.singlecare.com/blog/doxycyclinemonohydrate-vs-hyclate> [in English].
10. Saliy O.O., Kuryshko H.H., Oherenko Z.O. (2020). Doslidzhennia profiliv rozchynennia dlia otsinky alternatyvnoho vyrobnyka aktyvnoho farmatsevychnoho inhrediientu u skladi likarskoho zasobu. *Farmakoekonomika v Ukraini: stan ta perspektyvy rozvytku: materialy XII nauk.-prakt. INTERNET-konf., m.Kharkiv, 22 travnia 2020 r.* 166-167. [in Ukarainian].
11. Saliy E.A. Razrabotka tekhnolohyy polucheniya y masshtabyrovanye protsessa proyzvodstva kapsul Rybavyryna / Saliy E.A., Lytka V.V., Los A.V // *Ukrainskyi biofarmatsevychnyi zhurnal*. – 2010. no 1 (6). – p. 4-9 [in Russian].
12. Doksytysklinu khiklat// *Derzhavna Farmakopeia Ukrainy / Derzhavne pidpriemstvo «Naukovo-ekspertnyi farmakopeinyi tsentr»*. – 2-e vyd. — Kharkiv: Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovyi farmakopeinyi tsentr yakosti likarskykh zasobiv», 2014. T. 2. P. 214-216 [in Ukarainian].
13. Doslidzhennia bioekvivalentnosti. ST-N MOZU 42-7.1:2016/ DP «Derzhavnyi ekspertnyi tsentr Ministerstva okhorony zdorov'ia Ukrainy». – 72 p. [in Ukarainian].

SALIY OLENA

e-mail: saliy.oo@knutd.edu.ua

Researcher ID: AAC-5721-2019

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7103-2083>

Department of Pharmaceutical Industry of the Kyiv
National University of Technologies and Design

KURYSHKO HALINA

e-mail: Kuryshko_knutd@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2024-2088>

Department of Pharmaceutical Industry of the Kyiv
National University of Technologies and Design

ONERENKO ZLATA

e-mail: ogerenkoz777@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-9322>

Department of Pharmaceutical Industry of the Kyiv
National University of Technologies and Design

GETALO OLGA

e-mail: olgagetalo1970@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1768-611X>

Kyiv international University

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ
ДОКСИЦИКЛИНА ХИКЛАТА ИЗ ТВЕРДЫХ ЖЕЛАТИНОВЫХ КАПСУЛ ПРИ
ЗАМЕНЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА
САЛИЙ Е.А.¹, КУРЫШКО Г.Г.¹, ОГЕРЕНКО З.О.^{1, 2}, ГЕТАЛО О.В.²**

¹Киевский национальный университет технологий и дизайна

²Киевский международный университет

Цель. Проведение сравнительных исследований профилей высвобождения доксициклина хиклата из твердых желатиновых капсул, наработанных с действующим веществом альтернативных производителей.

Методика. Объектом исследования является образцы лекарственного средства доксициклина хиклата в форме твердых желатиновых капсул, изготовленных из АФИ утвержденного производителя «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd», Китай и альтернативного производителя «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd», Китай. Исследование профилей высвобождения действующего вещества из лекарственного средства проводили, используя «Прибор с лопастью». Количество высвобожденного вещества определяли методом абсорбционной спектрофотометрии.

Результаты. Исследовано лекарственное средство в твердых желатиновых капсулах по 100 мг на основе субстанции доксициклина хиклата двух производителей «Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd», Китай, и «Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd», Китай. Установлено, что по профилю примесей и результатами показателей качества субстанции доксициклина хиклата исследуемых производителей являются альтернативными и взаимозаменяемыми. Для подтверждения подобия профилей растворения доксициклин, капсулы по 100 мг проводили испытания в соответствии с требованиями ГФУ, 2.9.3. Тест «Растворение», с использованием буферных растворов при трех значениях pH: pH 1,2 (0,1 М HCl), pH 4,6 (ацетатный буфер) и pH 6,8 (фосфатный физиологический буфер). Проведенные сравнительные исследования *in vitro* для двух серий лекарственного средства установили о подобии кинетики высвобождения действующего вещества. Рассчитанные значения коэффициента сходства составляют: $f_2 = 78,4$ для раствора с pH = 1,2; $f_2 = 82,7$ для раствора с pH = 4,6 и $f_2 = 75,8$ для раствора с pH = 6,8. Согласно исследованиям в трех буферных растворах, коэффициента подобия находится в пределах от 50 до 100, что позволяет сделать вывод об альтернативности и возможности применения исследованного производителей АФИ для обеспечения производства лекарственного средства доксициклина хиклата в твердых желатиновых капсулах по 100 мг. Относительное стандартное отклонение среднего значения (RSD) степени высвобождения составляет менее 20% в первой точке контроля и не более 10%, начиная со второй и до последней точки контроля и свидетельствует о том, что результаты действительны.

Научная новизна. Доказано, что исследования профилей растворения твердых лекарственных форм *in vitro* позволяют оценить риски применения АФИ, синтезированного различными фирмами-производителями.

Практическая значимость. Полученные результаты эксперимента позволяют производителями готовых лекарственных средств обоснованно применять альтернативных производителей сырья для обеспечения бесперебойного промышленного производства и удовлетворения спроса рынка.

Ключевые слова. Доксициклина хиклат, твердые желатиновые капсулы, тест «Растворение», коэффициент подобия.

COMPARATIVE STUDIES OF THE RELEASE PROFILES OF DOXYCYCLINE
HYCLATE FROM SOLID GELATIN CAPSULES WHEN REPLACING THE
PRODUCERS OF THE ACTIVE SUBSTANCE

SALIY O.O.¹, KURYSHKO H.H.¹, OHERENKO Z.O.¹, GETALO O.V.²

¹Kyiv National University of Technologies and Design

²Kyiv International University

Purpose. Comparative studies of the release profiles of doxycycline hyclate from hard gelatine capsules, developed with the active ingredient of alternative manufacturers.

Methodology. The object of the study is samples of the drug doxycycline hyclate in the form of hard gelatin capsules made from an API of an approved manufacturer "Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd", China and an alternative manufacturer "Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd.", China. The study of the profiles of the release of the active substance from the drug was carried out using the "Paddle apparatus". The amount of the released substance was determined by the absorption spectrophotometry method.

Findings. A drug was investigated in hard gelatin capsules of 100 mg based on the substance of doxycycline hyclate from two manufacturers "Kaifeng Pharmaceutical Group Co. Ltd", China, and "Hebei Jiupeng Pharmaceutical Co., Ltd", China. It was found that according to the profile of impurities and the results of quality indicators, the substances of doxycycline hyclate from the studied manufacturers are alternative and interchangeable.

To confirm the similarity of the dissolution profiles of doxycycline, 100 mg capsules were tested in accordance with the requirements of the State Pharmacopoeia Department, 2.9.3. Dissolution test, using solutions at three pH values: pH 1.0 (0.1 M HCl), pH 4.6 (acetate buffer) and pH 6.8 (phosphate physiological buffer).

Comparative studies in vitro for two batches of the medicinal product established the similarity of the kinetics of the release of the active substance. The calculated values of the similarity factor are: $f_2 = 78.4$ for a solution with pH = 1.2; $f_2 = 82.7$ for a solution with pH = 4.6 and $f_2 = 75.8$ for a solution with pH = 6.8. According to studies in three buffer solutions, the similarity coefficient is in the range from 50 to 100, which allows it to conclude that the studied API manufacturers can be used as alternatives for the production of the drug doxycycline hyclate in hard gelatin capsules of 100 mg. The relative standard deviation of the mean (RSD) release rate is less than 20% at the first control point and not more than 10% from the second to the last control point, indicating that the results are valid.

Originality. It has been proven that the study of the dissolution profiles of solid dosage forms in vitro makes it possible to assess the risks of using APIs synthesized by various manufacturers.

Practical value. The obtained results of the experiment allow manufacturers of finished medicines to reasonably use alternative manufacturers of raw materials to ensure uninterrupted industrial production and meet market demand.

Keywords. Doxycycline hyclate, hard gelatin capsules, dissolution test, similarity factor.

УДК 620.194.22:
620.193.73

НИРКОВА Л. І.¹, ОСАДЧУК С. О.¹, БОРИСЕНКО Ю. В.²,
РУДНИЦЬКА-БОЦМАН М. О.²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

²Київський національний університет технологій та дизайну

ВПЛИВ РЕЖИМУ ТЕРМООБРОБЛЕННЯ НА ОСОБЛИВОСТІ ЛОКАЛЬНОЇ КОРОЗІЇ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ 08X18H10 У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Мета. Встановлення впливу термічного оброблення на опірність корозійному розтріскуванню нержавіючої сталі аустенітного класу 08X18H10 у водному середовищі та особливості локальної корозії.

Методика. Застосовували стандартні методики: випробування стійкості проти пітингової, міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування, метод спектрального аналізу, оптична металографія.

Результати. Вивчено вплив двох режимів термооброблення на чутливість нержавіючої сталі 08X18H10 аустенітного класу до локальних видів корозії: корозійного розтріскування, пітингової, міжкристалітної. Встановлено, що при термічному обробленні в інтервалі температур від 860 до 970 °С в деякій мірі підвищується опірність корозійному розтріскуванню порівняно зі зразками у вихідному стані, але відбувається утворення карбідів хрому по границях аустенітних зерен, що спричиняє міжкристалітну корозію та знижує пітингостійкість. Підвищення температури термічного оброблення до (910-1080) °С забезпечує задовільну опірність корозійному розтріскуванню, не викликає міжкристалітної корозії та не погіршує тривкість проти пітингової корозії. Оскільки тривкість виробу в цілому буде визначатися стійкістю проти того виду локального руйнування, до якого виявляється найменша стійкість, термооброблення за температур (910-1080) °С визначено раціональним.

Наукова новизна. За результатами комплексного дослідження отримані дані щодо впливу режимів термооброблення на стійкість нержавіючої сталі аустенітного класу 08X18H10 проти локальних видів корозії: корозійного розтріскування, пітингової та міжкристалітної корозії. Встановлено, що стійкість виробів зі сталі 08X18H10 у водному середовищі в цілому буде визначатися опірністю проти того виду локального руйнування, до якого сталь найменш стійка.

Практична значимість. За результатами досліджень обґрунтовано режим термічного оброблення гофрованої труби з нержавіючої сталі аустенітного класу 08X18H10, застосування якого забезпечує задовільну опірність корозійному розтріскуванню у воді та не погіршує стійкість проти міжкристалітної та пітингової корозії.

Ключові слова: нержавіюча сталь 08X18H10, пітингова корозія, міжкристалітна корозія, корозійне розтріскування, оптична мікроскопія.

Вступ. Нержавіюча сталь – високолегований сплав з вмістом хрому більше 10%, що в умовах окиснення (киснем повітря або киснем, розчиненим у воді), сприяє утворенню тонкого, але стабільного шару [1]. Згідно з ГОСТ 5632 [1] корозійностійкими (нержавіючими) є сталі та сплави, які є стійкими проти електрохімічної та хімічної корозії (атмосферної, ґрунтової, лужної, кислотної, сольової), міжкристалітної корозії, корозії під напруженням тощо.

Для водогінних труб холодного та гарячого водопостачання найчастіше використовують сталі аустенітного класу, що містять більше 16% хрому та 6% нікелю (часто менше 18% хрому та 8% нікелю). Нікель сприяє утворенню мікроструктури аустеніту (гранецентрована кубічна кристалічна ґратка), що забезпечує цій сталі механічну стійкість, високу пластичність, зварюваність. Аустенітні сталі є корозійностійкими. Додавання

молібдену (до 6%) додатково підвищує стійкість проти пітингової корозії, особливо у водних середовищах, що містять хлориди.

Стійкість проти корозії виробів з нержавіючої сталі у воді забезпечується завдяки присутності на їх поверхні дуже тонкого пасивного шару. Нержавіючі сталі у водних системах, загалом, стійкі, хоча існують певні умови, за яких вони можуть зазнавати корозійних уражень [2]. Швидкість рівномірної корозії нержавіючих сталей у системах розподілу та зберігання води незначна через їх пасивний стан. Імовірність міжкристалітної корозії є низькою в цій системі [2].

У деяких випадках, пасивний шар на нержавіючих сталях може бути локально зруйнований, що призведе до локалізації корозійного процесу. Внаслідок складної взаємодії різних чинників, перебіг корозійного процесу носить імовірнісний характер. Нержавіючі сталі схильні до таких видів корозії: пітингової, щілинної, корозії від напруження тощо.

Пітингова корозія – локальне руйнування металів у вигляді окремих точкових уражень є одним з найбільш небезпечних видів корозії, яка характерна для хромонікелевих сталей, що експлуатуються у водних середовищах [3].

Внаслідок складної взаємодії різних чинників, перебіг корозійного процесу носить **імовірнісний** характер [2]. Пітингова корозія може виникати лише в тому випадку, якщо окислювально-відновний потенціал води є більш позитивним, ніж потенціал пітингоутворення. Потенціал ініціації пітингу залежить від параметрів, що відносяться, як до матеріалу, так і до складу води [2]. Пітингова корозія відбувається, якщо пасивна плівка пошкоджена внаслідок хімічного або механічного впливу, за наявності в мікроструктурі неметалевих включень, викликаних механічним обробленням. В розвитку процесу пітингової корозії виділяють 3 стадії: зародження пітингів, взаємодія між ними і злиття пітингів [3].

Стійкість нержавіючої сталі проти пітингової корозії можна оцінити за індексом пітингостійкості – PREN (pitting resistance equivalent) згідно з рівнянням [4] (для сталей аустенітного класу $k = 30$):

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + k \times \%N$$

За результатами накопиченого досвіду відомо, що сталь є стійкою до пітингової корозії в морській воді, якщо індекс пітингостійкості більше 35, в гарячій та застійній морській воді, якщо індекс $\text{PREN} > 40$, стійкість проти щілинної корозії забезпечується при індексі пітингостійкості більше 45 [4].

Явно вираженого впливу структурного чинника на пітингостійкість не встановлено [9]. Прийнято вважати, що аустенітна структура більш стійка проти пітингової корозії, на що вказують факти зниження пітингостійкості при появі в аустенітній структурі δ -фериту (при термічному обробленні) і мартенситу (при деформації). Однак, зниження стійкості пов'язане з локальною зміною хімічного складу аустеніту і появою фази іншого, ніж аустеніт, складу – ферит, мартенсит, внаслідок чого пітингоутворення йде, переважно, на границі зерен аустеніт-ферит та неметалевих включеннях. Вважають, що хімічний склад сильніше впливає на пітингостійкість, ніж структурний чинник [7].

Міжкристалітна корозія – корозія, що поширюється границями кристалітів (ДСТУ 3830) [5].

Термічне оброблення феритних або аустенітних нержавіючих сталей призводить до того, що місця контакту окремих кристалів (так звані границі зерен) стають особливо

чутливими до локальної корозії, що призводить до катастрофічного зменшення механічної міцності виробів. Оброблення певної тривалості при певній температурі, внаслідок чого сплав набуває чутливості до міжкристалітної корозії (МКК), називається провокуючим термічним обробленням або сенсibilізацією. Режими такого оброблення для феритних і аустенітних сталей сильно розрізняються. Достатньо додати до сплаву, що містить 18 % Cr, лише (2,5-3) % Ni, щоб змінилася температура сенсibilізації [6].

Для аустенітних сплавів інтервал сенсibilізуючих температур становить (400-850) °C. Ступінь схильності до МКК після такого нагріву залежить від часу нагрівання. Кілька хвилин нагрівання за температур близько 750 °C еквівалентні декільком годинам при більш низьких (або ще вищих) температурах [7]. До МКК призводять повільне охолодження сплаву з проходженням області сенсibilізуючих температур, а також тривалі зварювальні роботи. При швидкому охолодженні цього не відбувається. Отже, аустенітні нержавіючі сталі потрібно загартувати за високих температур. Ступінь сенсibilізації для даної температури і часу сильно залежить від вмісту в сплаві вуглецю. Нержавіюча сталь 18-8, що містить 0,1 % вуглецю або більше, може бути помітно сенсibilізована при нагріванні протягом 5 хвилин при 600 °C. Водночас аналогічне термічне оброблення подібної сталі, що містить 0,06 % вуглецю, впливає менше, а при вмісті вуглецю 0,03 % сталь не піддається помітному руйнуванню при витримуванні в помірно агресивних водних середовищах. Чим вищий вміст нікелю в сплаві, тим менше часу потрібно для сенсibilізації за даної температури. Легування сталей молібденом збільшує цей час [7].

За наявності прикладеного або залишкового розтягуючого напруження нержавіючі сталі в деяких середовищах можуть піддаватися *корозійному розтріскуванню*. Небезпеку представляють розтягуючі напруження: чим вище їх рівень, тим менше час до руйнування. Хоча при малих напруженнях час до руйнування може бути більшим, практично не існує мінімального напруження, нижче якого не відбувається розтріскування при тривалому контакті з корозивним середовищем.

Для аустенітних сталей основну небезпеку представляють гідроксид- і хлорид-іони. Киплячі концентровані розчини хлоридів, наприклад, FeCl₂ або MgCl₂, які при гідролізі дають слабокислі розчини, за кілька годин можуть викликати розтріскування напружених виробів великого перетину зі сталі 08X18H10. Наявність розчиненого кисню в цих середовищах не є необхідним для того, щоб відбувалося розтріскування, однак, його присутність прискорює руйнування. Пітинг не є обов'язковою умовою для ініціації тріщин. У розчинах NaCl і аналогічних нейтральних розчинах розтріскування спостерігається тільки в присутності розчиненого кисню [7], причому кількість Cl⁻, необхідна для ініціювання розтріскування, може бути дуже малою. Пітинг у хлоридвмісних розчинах утворюється в присутності кисню, тому наявність кисню є необхідною умовою для протікання корозійного розтріскування. Вплив кисню проявляється також у тому, що тільки в його присутності потенціал корозії зміщується в бік більш позитивних значень, ніж критичний потенціал корозійного розтріскування.

У лужних розчинах розтріскування відбувається при відносно високих концентраціях OH⁻, тому в лужній котловій воді звичайно не спостерігають розтріскування сталі 08X18H10. Однак воно може відбуватися над ватерлінією в зонах розбризкування, де концентрація лугів

збільшується внаслідок випаровування води. У таких випадках руйнування може перебігати навіть за відсутності в лугу розчиненого кисню [7].

Наведені дані одержали різноманітні пояснення, однак вони переконливо доводять, що сталь у зазначених випадках руйнується в результаті або водневого розтріскування, або корозійного розтріскування. За наявності в сталі високих напружень, вона може розтріскуватися у воді. Очевидно, у цьому випадку вода безпосередньо адсорбується на поверхні й зменшує міцність металевих зв'язків у ступеню, достатньої для зародження тріщин (адсорбційне розтріскування).

Постановка завдання. Оскільки вироби з гофрованої сталі 08X18H10 схильні до корозійного розтріскування у воді внаслідок присутності у них напружень, викликаних процедурою гофрування, представляється доцільним вивчити способи підвищення опірності корозійному розтріскуванню, що практично реалізуються. Відомо, що термооброблення сприяє зниженню напружень в металі, але з іншого боку, воно може підвищувати схильність до міжкристалітної корозії та погіршувати п'ятингостійкість. Тому необхідно дослідити вплив режиму термооброблення на комплекс корозійних властивостей нержавіючої сталі 08X18H10, від якого залежить безвідмовна робота виробів з неї.

Методика експериментів. Дослідження проводили на зразках, вирізаних з гофрованої труби з нержавіючої сталі 08X18H10 розміром 143 мм × 0,9 мм. Зразки піддавали термічному обробленню (ТО) за режимами, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

Режими термообробки досліджуваних зразків

Маркування зразків	Умовний номер режиму ТО	Режим термооброблення		
		Швидкість руху труби, м/хв	Температура, °C	
			На початку ТО	У кінці ТО
1 (без ТО)	-	-	-	-
2	1	1	860	970
3	2	1,1	910	1080

Хімічний склад сталі у вихідному стані та після термообробки контролювали методом спектрального аналізу на фотоелектричному спектрометрі ДФС-15. Результати порівнювали з хімічним складом сталі 08X18H10, табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад досліджуваних зразків

Маркування зразків, марка сталі згідно з [1]	Масова частка елементів, %					
	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
1	0,47	1,1	18,4	8,5	0,25	0,17
2	0,47	1,6	18,2	8,5	0,32	0,30
3	0,54	1,3	18,9	9,4	0,30	0,30
08X18H10	0,8	2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	0,50	≤ 0,30

Встановлено, що досліджені зразки за вмістом основних легуючих елементів – хрому (від 17,0 % до 19,0 %) і нікелю (9,0-11,0) % ідентичні сталі 08X18H10. Залишковий вміст

інших елементів, який не нормується (мідь, молібден), не перевищує нормовані значення.

Випробування стійкості проти корозійного розтріскування виконували відповідно до [8]. Метод випробувань полягає у витримуванні зразків у розчині 42 % MgCl_2 при температурі кипіння (155 °С) до утворення першої корозійної тріщини. Огляд зразків виконували через 5 годин після початку випробувань, далі – один раз на тиждень.

Випробування стійкості проти міжкристалітної корозії (МКК) проводили згідно з ГОСТ 6032 (метод АМУ) [9]. Зразки витримували у киплячому водному розчині, який містив: 50 г міді сірчаною кислотою, 250 см³ сірчаної кислоти, 1000 см³ води. В ємність насипали мідну стружку, щоб забезпечити уникнення контакту зразків один з іншим. Кип'ятіння проводили впродовж 8 годин. Після випробувань зразки промивали проточною водогінною, потім дистильованою водою, висушували фільтрувальним папером. Мікроструктуру досліджували металографічним методом. Металографічні шліфи виготовляли за стандартною методикою, огляд проводили на мікроскопі НЕОРНОТ 32. Цифрове зображення мікроструктури отримували за допомогою фотокамери «Olympus C 5050». Твердість по Віккерсу вимірювали на мікротвердоміри М-400 фірми «Лесо» при навантаженні 100 г. Бал зерна визначали відповідно до ГОСТ 5639 [10].

Випробування стійкості проти пітингової корозії проводили згідно з ГОСТ 9.912 [11], (пункт 1, хімічний метод). Розмір зразків становив приблизно 70 мм² × 90 мм². У верхній частині зразків для підвішування в випробувальному розчині просвердлювали отвір діаметром 2 мм. Підготування кромek зразків проводили відповідно до ГОСТ 9.912. Перед випробуваннями зразки знежирювали оксидом магнію, промивали в проточній водогінній воді, ополіскували дистильованою водою, висушували фільтрувальним папером і розміщували на кюветі. Підготовлені зразки витримували в сушильній шафі при температурі (105 – 110) °С протягом 1 години, після чого зразки поміщали в ексикатор для охолодження і кондиціонування на 24 години. Зразки витримували впродовж 5 годин в 10 % розчині заліза трихлорида гексагідрату ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) густиною 1,049 г/см³ при кімнатній температурі, потім розраховували число пітингів на одиницю площі внутрішньої поверхні зразка за формулою:

$$N = \frac{n}{S} \quad (1)$$

де N – число пітингів на одиницю площі внутрішньої поверхні зразків (шт/м²),

S – площа внутрішньої поверхні зразків (м²),

n – число пітингів на внутрішній поверхні зразків, видимих неозброєним оком (шт).

Результати дослідження. *Дослідження мікроструктури.* Мікроструктура всіх досліджених зразків аустенітна з сильно вираженими слідами деформації (рис. 1). Феритної фази в зразках не виявлено.

Як видно з фотографії мікроструктури, рис. 1, на зразку № 2 по границях зерен аустеніту виявлені виділення. З літератури відомо [12], що при нагріванні аустенітної сталі до температури (450-850) °С і витримуванні при цій температурі впродовж певного часу виникає термодинамічна імовірність переходу хрому з вільного у зв'язаний стан з утворенням карбиду хрому складу Cr_{23}C_6 і виділенням його по границях аустенітних зерен. Швидкість дифузійного переміщення вуглецю в сталі при нагріванні перевищує швидкість дифузійного переміщення хрому. В процесі утворення карбідів хрому бере участь практично

весь вуглець, який дифундує до границь зерен з їх об'єму. Хром, що входить до складу карбіду Cr_{23}C_6 , дифундує тільки з приграничних шарів зерен, оскільки через повільну швидкість дифузії він не встигає дифундувати з глибини зерен.

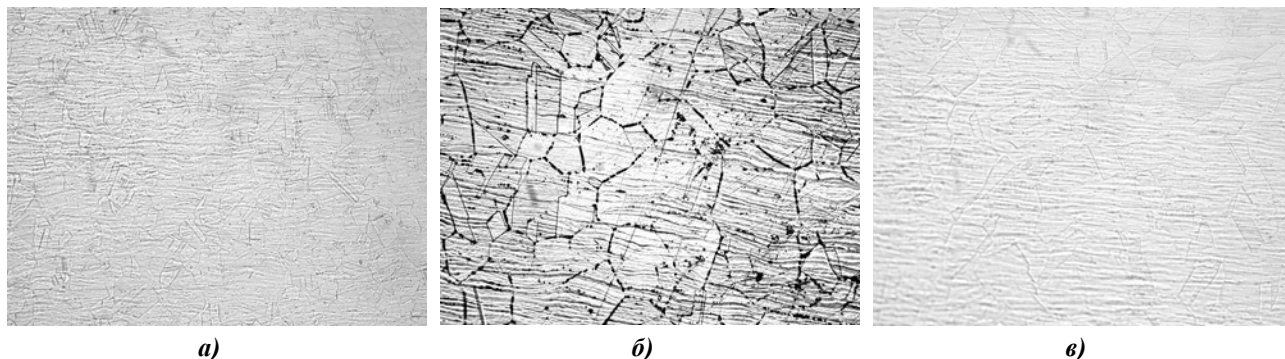


Рис. 1. Мікроструктура досліджуваних зразків: *а* – зразок № 1 у вихідному стані ($\times 250$); *б* – зразок № 2 після ТО за температури (860-970) °C ($\times 320$); *в* – зразок після ТО за температури (910-1080) °C ($\times 250$)

В результаті в структурі виникає локальна хімічна неоднорідність. Карбіди хрому Cr_{23}C_6 , збагачені хромом, виділяються по границях зерен, а ділянки, що безпосередньо прилягають до них, виявляються збіднені хромом. При цьому такі ділянки зерен і ділянки, що безпосередньо прилягають до них, переходять в активний стан по відношенню до зерен, що знаходяться в пасивному стані. При дифузії і карбідоутворенні вміст хрому по границях аустенітних зерен стає менше 12 %, тобто, нижче того рівня, який забезпечує корозійну тривкість нержавіючої сталі. У корозивному середовищі може відбуватися селективне корозійне руйнування ділянок, збіднених хромом.

Найбільш дрібне зерно спостерігали на зразку у вихідному стані (бал 6). Після термооброблення за режимом 1 (зразок №2) розмір зерен збільшився до балу 4. Термооброблення за режимом 2 практично не збільшувало розмір зерен, який дорівнював балу (5-6). Мікротвердість зразка у вихідному стані – найбільша, після термооброблення цей показник зменшився до 1610 МПа для зразка №2 і до 2050 МПа для зразка №3 (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристика мікроструктури досліджуваних зразків

Маркування зразків	Характер мікроструктури	Розмір зерна, бал	Мікротвердість, HV_{10} , МПа
1	Аустеніт зі слідами деформації	6	2210-2290
2		4	1550-1610
3		5-6	2010-2050

Дослідження опірності корозійному розтріскуванню. За результатами досліджень встановлено, що на зразку у вихідному стані тріщина утворилась через 5 годин (рис. 2, а), на зразку, термообробленому при температурі (860-970) °C – через 255 годин (рис. 2, б).

Можна припустити, що нагрівання до вищезазначеної температури сприяло в деякій мірі зняттю напружень, які утворилися у трубі при її гофруванні, що збільшило час до утворення першої тріщини. Але осадження карбідів хрому по границях аустенітних зерен внаслідок дифузії хрому з об'єму зерен до їх границь при температурному впливі могло

підвищити чутливість до міжкристалітної корозії, що в подальшому стало причиною корозійного розтріскування.

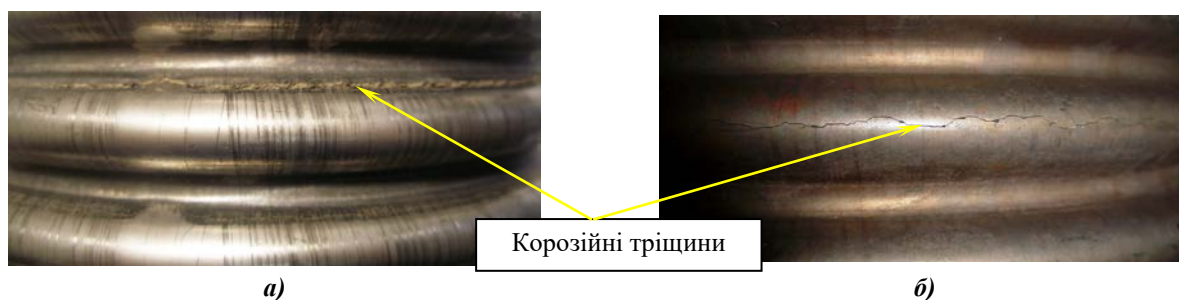


Рис. 2. Фотографія корозійних тріщин після випробувань опірності корозійному розтріскуванню: *а* – зразок № 1 (у вихідному стані), *б* – зразок № 2 (після ТО за температури (860-970) °C).

Зразок, оброблений за температури (910-1080) °C продемонстрував задовільну тривкість проти корозійного розтріскування (тріщини після випробувань впродовж 1500 годин не утворилися). Далі дослідили вплив термооброблення на стійкість проти пітингової та міжкристалітної корозії.

Дослідження тривкості проти міжкристалітної корозії. На зразку у вихідному стані міжкристалітної корозії не виявлено. Наявні локально зруйновані ділянки шириною від 10-15 мкм до 40 мкм глибиною приблизно 15-20 мкм, рис. 3.

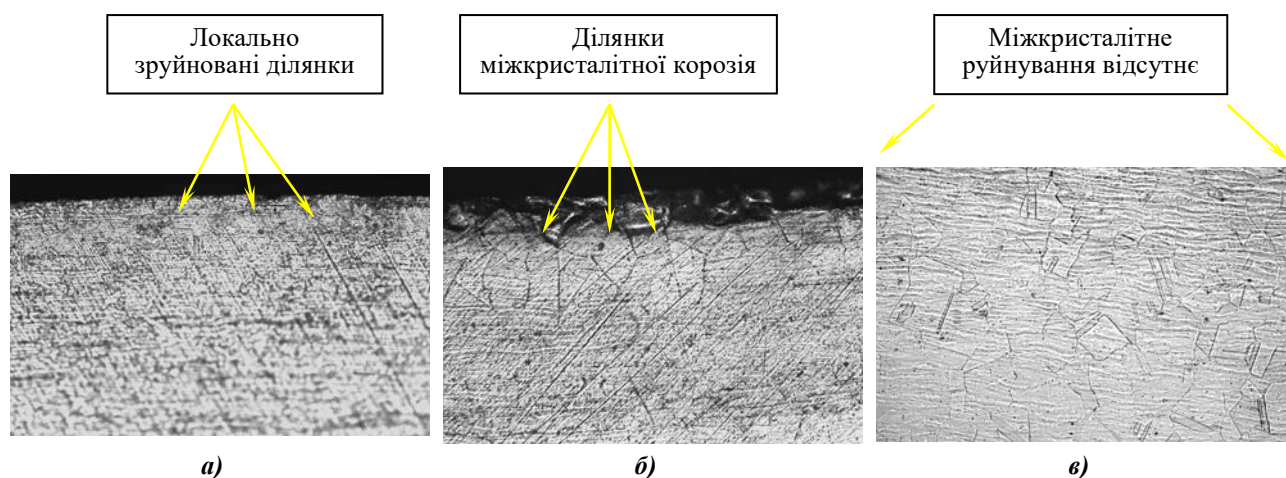


Рис. 3. Фото досліджуваних зразків після випробувань стійкості проти МКК:

а – зразок у вихідному стані ($\times 320$); *б* – зразок після ТО за температури (860-970) °C ($\times 320$); *в* – зразок після ТО за температури (910-1080) °C ($\times 250$)

Як зазначалося вище, по границях зерен зразка № 2 виявлено сегрегацію карбідів хрому. Не виключено, що це сприяло корозійному розтріскуванню. Отже, на зразку № 2 виявлена міжкристалітна корозія, яка розповсюджується по границях зерен на глибину 50-60) мкм, а також ділянки з локальним руйнуванням глибиною приблизно (35-50) мкм завширшки (100-125) мкм. Є ділянки поверхні, на яких цілісність кромки ще зберігається, але метал став нещільним (глибина таких ділянок становить близько 50 мкм).

Згідно з критерієм стійкості проти МКК, наведеним у ГОСТ 6032 (пункт 2.3.20) ознакою стійкості проти міжкристалітної корозії при металографічному контролі в зразках з металопродукції товщиною менше 1,5 мм вважається руйнування границь зерен на

максимальну глибину не більше 10 мкм, якщо немає інших вказівок у стандартах на металопродукцію. Зразок № 3 виявився стійким проти МКК, рис. 3, в, локальне руйнування по границях зерен на ньому відсутнє.

Дослідження тривкості проти пітингової корозії. Зовнішній вигляд зразків після випробувань на пітингостійкість наведено на рис. 4. Візуальним оглядом встановлено, що на зразку у вихідному стані утворились ненаскрізні пітинги, які при детальному вивченні мають неправильну форму. Обчислена кількість пітингів дорівнює 1060 шт/м². На зразку № 2, термообробленому за режимом 1, кількість пітингів найбільша, рис. 4, б. На цьому зразку утворилися як поверхневі, так і наскрізні пітинги, на деяких ділянках вони злились та утворили наскрізні ураження неправильної форми. Кількість пітингів для цього зразка дорівнює 1120 шт/м². На зразку № 3, термообробленому за режимом 2, кількість пітингів менше (рис. 4, в), ніж на двох вищезазначених зразках (№ 1 та № 2), і становить 420 шт/м².



Рис. 4. Поверхня зразків після випробувань стійкості проти пітингової корозії: а – зразок у вихідному стані; б – зразок після ТО за температури (860-970) °С; в – зразок після ТО за температури (910-1080) °С

Таким чином, пітингостійкість зразків залежить від режиму ТО. При обробленні за температури від 860 до 970 °С виявили зниження пітингостійкості. Як зазначалося при аналізі мікроструктури, після ТО за цим режимом виявлено скупчення карбідів хрому по границях зерен. Імовірно, що при контакті з корозивним середовищем відбувалося локальне руйнування на цих ділянках з утворенням пітингів. Раціонально підібраний режим термооброблення, яким виявився режим 2, не сприяв погіршенню пітингостійкості, що підтверджено кількістю пітингів, яке було співрозмірним з їх кількістю на зразку у вихідному стані.

Висновки. Розглянуто вплив термооброблення на чутливість нержавіючої сталі 08X18H10 до локальної корозії. Встановлено, що при термообробленні за температур (860-970) °С відбувається утворення карбідів хрому по границях аустенітних зерен, що викликає корозійне розтріскування та знижує стійкість проти пітингової корозії. Підвищення температури термооброблення до (910-1080) °С задовільно підвищує опірність корозійному розтріскуванню, не викликає міжкристалітної корозії та не погіршує тривкість проти пітингової корозії. На стійкість сталі 08X18H10 проти локальної корозії у водному середовищі впливає її схильність до міжкристалітної корозії, пітингової корозії та корозійного розтріскування. Тривкість виробу в цілому буде визначатися стійкістю проти того виду локального руйнування, до якого виявляється найменша стійкість.

Робота виконана за підтримки Національної академії наук України у 2013–2015 рр. (державний реєстраційний номер теми 0110U005101).

Література

1. ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Москва. Дата введения 1975-01-01.
2. BS EN 12502-4:2004. Protection of metallic materials against corrosion – Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems. Part 4: Influencing factors for stainless. London. British Standards Institution. 2004. 16 p.
3. Кайдриков Р. А., Виноградова С. С. Питтинговая коррозия металлов и многослойных систем (исследование, моделирование, прогнозирование, мониторинг). *Вестник Казанского технологического университета: спец-ть Технология электрохимических производств*. 2010. С. 212-227.
4. Site «Degremont® water handbook». URL: <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/corrosion-in-metal-and-concrete/corrosion-in-metallic-materials/stainless-steel> (Last accessed 18.08.2020 p.)
5. ДСТУ 3830-98. Корозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять. Київ. Дата початку дії 2000-01-01.
6. Site “Design guidelines for the selection and use of stainless steel. Distributed by nickel development institute courtesy of American iron and steel institute and specialty steel institute of North America». URL: https://www.nickelinstitute.org/media/1667/designguidelinesfortheselectionanduseofstainlesssteels_9014.pdf (Last accessed: 18.08.2020).
7. Сокол И. Я., Ульянин Е. А., Фельдгандлер Э. Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Москва: Металлургия, 1989. 400 с.
8. G36 – 94-2013. Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution. 7 p.
9. ГОСТ 6032-89. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии. Москва. Дата введения 1990-07-01.
10. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Москва. Дата введения 1983-01-01.
11. ГОСТ 9.912-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Методы

References

1. GOST 5632-72. *Stali vy`sokolegировanny`e i splavy` korroziionno-stojkie, zharostojkie i zharoprochny`e yu Marki* [High-alloy steels and corrosion-proof, heat-resisting and heat treated alloys. Grades]. Moscow. Izd. Standartov, 1975, 64 p.
2. BS EN 12502-4:2004. Protection of metallic materials against corrosion – Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems. Part 4: Influencing factors for stainless. London. British Standards Institution. 2004. 16 p.
3. Kajdrikov, R. A., Vinogradova, S. S. (2010) Pittingovaya korroziya metallov i mnogoslojny`kh sistem (issledovanie, modelirovanie, prognozirovanie, monitoring). [Pitting corrosion of metals and multilayer systems (research, modeling, forecasting, monitoring)]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta: spets-t' Tekhnologiya elektrokhimicheskikh proizvodstv. - Electrochemical production technology. Bulletin of Kazan Technological University: specialty technology of electrochemical production*. 2010. p. 212-227 [in Russian].
4. Site «Degremont® water handbook». URL: <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/corrosion-in-metal-and-concrete/corrosion-in-metallic-materials/stainless-steel> (Last accessed: 18.08.2020 p.)
5. DSTU 3830-98. *Korozi`ya metaliv` i` splaviv`. Termini ta viznachennya osnovnykh ponyat`* [Corrosion of metals and alloys. Terms and definitions of basic concepts]. Kyiv. 1999. 36 p.
6. Site “Design guidelines for the selection and use of stainless steel. Distributed by nickel development institute courtesy of American iron and steel institute and specialty steel institute of North America». URL : https://www.nickelinstitute.org/media/1667/designguidelinesfortheselectionanduseofstainlesssteels_9014.pdf (Last accessed: 18.08.2020).
7. Sokol, I. Ya., Ul`yanin, E. A., Fel`dgandler, E. G. i dr. (1989). *Struktura i korroziya metallov i splavov* [Structure and corrosion of metals and alloys: Atlas]. Moscow [in Russian].
8. G36 – 94-2013. *Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution*. 7 p.
9. GOST 6032-89. *Stali i splavy` korroziionno-stojkie. Metody` ispy`taniya na stojkost` protiv mezhkristallitnoj korrozii* [Corrosion-resistant steels and alloys. Methods for determination of intercrystalline corrosion resistance]. Moscow, Izd. Standartov, 1990. 43 p.
10. GOST 5639-82. *Stali i splavy`. Metody` vy`yavleniya i opredeleniya velichiny` zerna*. [Steels and alloys. Methods for determination of grain size]. Moscow, Izd. Standartov, 1983, 21 p.

ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии. Москва. Дата введения 1991-01-01.

12. Гуляев А. П. Металловедение. Москва: Металлургия, 1977. 650 с.

11. GOST 9.912-89. *Edinaya sistema zashchity` ot korrozii i stareniya. Metody` uskoreny`kh ispy`taniy na stojkost` k pittingovoj korrozii* [Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion-resistant steels and alloys. Method of accelerated tests for resistance to pitting corrosion]. Moscow, Izd. Standartov, 1990. 18 p.

12. Gulyaev, A. P. (1977). *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow: Metallurgiya. 650 p. [in Russian].

LYUDMILA NYRKOVA

lnyrkova@gmail.com

Chief of the department of welding of oil and gas pipes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>

Researcher ID: 6506092726

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine

SVETLANA OSADCHUK

svetlanaosadchuk@meta.ua

Junior Researcher of welding of oil and gas pipes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>

Researcher ID: 5215010000

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine

YULIYA BORYSENKO

boria95@ukr.net

Associate professor, assistant professor of department for electrochemical power engineering & chemistry

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-0205>

Kyiv National University of Technologies and Design

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08X18H10 В ВОДНОЙ СРЕДЕ

НЫРКОВА Л. И.¹, ОСАДЧУК С. А.¹, БОРИСЕНКО Ю. В.²,
РУДНИЦКАЯ-БОЦМАН М. А.²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

²Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследование влияния термообработки на устойчивость коррозионному растрескиванию нержавеющей стали 08X18H10 в водной среде и особенностей локальной коррозии.

Методика. Применяли стандартные методики: испытания устойчивости против питтинговой, межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания, метод спектрального анализа, оптическая металлография.

Результаты. Изучено влияние двух режимов термообработки на чувствительность нержавеющей стали 08X18H10 к локальным видам коррозии: коррозионного растрескивания, питтинговой, межкристаллитной. Установлено, что при термообработке в интервале температур от 860 до 970 °С в некоторой степени повышается сопротивляемость коррозионному растрескиванию по сравнению с образцом в исходном состоянии, но происходит образование карбидов хрома по границам аустенитных зерен, что вызывает межкристаллитную коррозию и снижает питтингоустойчивость. Повышение температуры термообработки до (910-1080) °С обеспечивает удовлетворительную устойчивость коррозионному растрескиванию, не вызывает межкристаллитной коррозии и не ухудшает устойчивость против питтинговой коррозии. Поскольку работоспособность изделия в целом будет определяться стойкостью против того вида локального разрушения, к которому наблюдается наименьшая сопротивляемость, термообработка при температуре (910-1080) °С является рациональной.

Научная новизна. По результатам комплексного исследования получены данные о влиянии режимов термообработки на устойчивость нержавеющей стали против локальных видов коррозии: коррозионного растрескивания, питтинговой, межкристаллитной. Устойчивость изделия из стали 08X18H10 в водной среде в целом будет определяться сопротивляемостью против того вида локального разрушения, к которому сталь наименее устойчива.

Практическая значимость. По результатам исследований обоснован режим

термообработки гофрированной трубы из нержавеющей стали 08Х18Н10, применение которого обеспечивает удовлетворительную устойчивость коррозионному растрескиванию в воде и не ухудшает стойкость против межкристаллитной и питтинговой коррозии.

Ключевые слова: нержавеющая сталь 08Х18Н10, питтинговая коррозия, межкристаллитная коррозия, коррозионное растрескивание, оптическая микроскопия.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE PECULIARITIES OF LOCAL CORROSION OF 08H18N10 STAINLESS STEEL IN WATER ENVIRONMENT

NYRKOVA L. I.¹, OSADCHUK S. O.¹, BORYSENKO Yu. V.²,
RUDNYTSKA-BOTSMAN M.O.²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

²Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Establishment of the effect of heat treatment on the corrosion resistance of 08H18N10 stainless steel of austenitic class in an aqueous medium and peculiarities of local corrosion.

Methodology. Standard methods were used: resistance testing against pitting and intergranular corrosion and corrosion cracking, spectral analysis method, optical metallography.

Results. The influence of two modes of heat treatment on the sensitivity of 08H18N10 stainless steel of austenitic class to local types of corrosion: corrosion cracking, pitting and intergranular corrosion was investigated. It was found that heat treatment in the temperature range from 860 to 970 °C in some extent increases the resistance against corrosion cracking compared to the sample in the initial state, but the formation of chromium carbides at the boundaries of austenitic grains, which causes intergranular corrosion and reduces pitting resistance are take place. Increasing the heat treatment temperature to (910-1080) °C provides satisfactory resistance to corrosion cracking, does not cause intergranular corrosion and does not impair the resistance to pitting.

Scientific originality. According to the results of a complex study, data on the influence of heat treatment regimes on the resistance of stainless steel against local corrosion such as: corrosion cracking, pitting and intergranular corrosion were obtained. The stability of the manufactures made of 08H18N10 steel in the aqueous medium as a whole will be determined by the resistance against that type of local destruction to which the steel is least resistant. Since the endurance of the product as a whole will be determined by the resistance to the such type of local destruction to which the least resistance is found, heat treatment at a temperature of (910-1080) °C is determined to be rational.

Practical value. According to the research results, the heat treatment regime of corrugated pipe of stainless steel 08H18N10, using of which provides satisfactory resistance against corrosion cracking in water and does not impair the resistance against intergranular and pitting corrosion is substantiated.

Key words: stainless steel 08H18N10, pitting corrosion, intergranular corrosion, corrosion cracking, optical microscopy.

УДК 661.179

НАЗАРЕНКО О.В., ІВАНЧЕНКО А.В., КОЛЕСНИКОВА О.Ю.

Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НІТРАТНОКИСЛОТНОЇ ПЕРЕРОБКИ ФОСФОГІПСУ З ОДЕРЖАННЯМ КОНЦЕНТРАТУ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Дослідити процес вилучення рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу шляхом взаємодії його із розчином нітратної кислоти, концентрацією 25, 30 і 35 % при співвідношенні «фосфогіпс:кислота» 1:2 та температурі 70⁰С з одержанням очищеного кальцій сульфату.

Методика. Створено лабораторну установку нітратнокислотної переробки фосфогіпсу з одержанням концентрату рідкісноземельних елементів. Експериментальні дослідження проводили із застосуванням титриметричного методу із використанням трилону Б для визначення концентрації рідкісноземельних елементів в отриманих фільтратах.

Результати. Зроблено огляд науково-технічної літератури у області перспективних способів переробки фосфогіпсу. Найбільш альтернативним методом переробки фосфогіпсу є отримання рідкісноземельних елементів шляхом кислотного вилуговування, що забезпечується використанням мінеральних кислот. На основі отриманих даних встановлено, що при підвищенні концентрації нітратної кислоти з 25 до 35%, вміст рідкісноземельних елементів (РЗЕ) у фільтратах зразків підвищується з 0,21 до 1,68 г/дм³ відповідно. З'ясовано, що ступінь вилучення концентрату РЗЕ із фосфогіпсу найвищий при концентрації кислоти 25% і становить 22,8%, а з підвищенням концентрації HNO₃ він зменшується майже у 2,5 рази. Визначено оптимальну концентрацію розчину нітратної кислоти, яка становить 25% та взаємодіє з фосфогіпсом для подальшого вилучення осаду рідкісноземельних елементів. Виявлено оптимальну температуру нітратнокислотної переробки фосфогіпсу, що становить 70⁰С.

Наукова новизна. Одержано закономірності процесу вилучення концентрату рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу кислотним вилуговуванням. Науково обґрунтовано використання нітратної кислоти для одержання рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу та отримання осаду очищеного фосфогіпсу від розчинних домішок.

Практична значимість. Визначено вміст рідкісноземельних елементів у фільтраті при різній концентрації кислоти. Встановлено ефективність вилучення осаду рідкісноземельних елементів з фосфогіпсу шляхом взаємодії з розчином нітратної кислоти концентрацією 25, 30 та 35% відповідно. Очищений фосфогіпс надалі може бути використаний для отримання гіпсового в'язучого в будівельній промисловості та у технології отримання добрив у сільському господарстві. Концентрат рідкісноземельних елементів може бути застосованим в медицині, металургії та в інших галузях як з виділенням окремих елементів так і в цілому.

Ключові слова: фосфогіпс, концентрат рідкісноземельних елементів, нітратнокислотна обробка, температура, фільтрат, концентрація.

Вступ. У наш час без застосування добрив розвиток агропромислового комплексу стає неможливим [1]. У середині 90-х років екстракційну фосфатну кислоту одержували у кількості близько 20 млн. т у перерахунку на Р₂О₅, при цьому утворилось близько 90 млн. т фосфогіпсу. На сьогоднішній день щороку об'єми нагромадження його у світі складають 120-130 млн. т, при чому масова частка утилізації не перевищує 10-15% [2].

Існує ряд прикладів прямого використання фосфогіпсу у сільському господарстві без принципових технологій його підготовки, наприклад, фосфогіпс ефективний для меліорації заболочених і солончакових ґрунтів [3].

В останні роки освоєно технологію одержання гіпсового в'язучого із відвального фосфогіпсу [4]. У ході розробки даної технології встановлено, що із відвального фосфогіпсу,

який одержано під час переробки апатитового концентрату, можливо одержувати в'язуче марки Г-5 і вище, а характеристики міцності якого не поступаються β -в'язучому із природного гіпсового каменю. Численні дослідження присвячені використанню фосфогіпсу у виробництві наповнювачів для гуми та паперу, а також для одержання пігментів [5].

Одним із перспективних шляхів утилізації фосфогіпсу є використання його як сировини для одержання рідкісноземельних елементів (РЗЕ). Рідкісноземельні елементи – це група із 17 елементів, що включає лантан, скандій, ітрій та лантаноїди. Вони використовуються при створенні електроніки, лазерів, супермагнітів, надпровідників, а також затребувані в металургії та медицині [6]. Рідкісноземельні метали використовують при виготовленні сталей, оскільки вони відіграють три основних функції: модифікація включень, глибоке очищення сталі і легування [7].

Рідкісноземельні елементи, завдяки своїм унікальним властивостям, є основними необхідними матеріалами для розвитку високотехнологічних галузей, таких як космонавтика, атомна промисловість, радіоелектроніка. Попит на рідкісноземельні елементи зростає з кожним роком, на сьогоднішній день спостерігається їх дефіцит у світі. Розрахунковий розподіл рідкісноземельних елементів за кінцевим використанням у світі за 2019 рік показано на рис. 1[8].

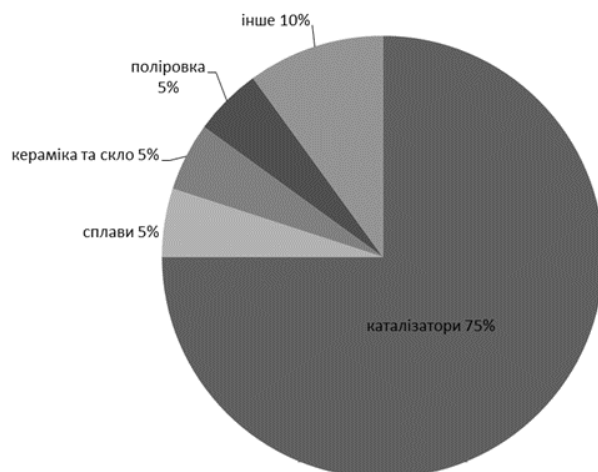


Рис. 1. Розрахунковий розподіл використання рідкісноземельних елементів у світі

Отже, зростаючий попит на рідкісноземельні елементи, викликає все більший видобуток їх та розробку нових процесів для вилучення РЗЕ з вторинних ресурсів, одним з яких є фосфогіпс. Фосфогіпс в своєму складі має низьку концентрацію рідкісноземельних елементів, але доступний у великих обсягах в Україні та в світі, що дає підстави для вилучення з нього цих цінних металів [9]. Нижче наведено дані видобутку рідкісноземельних елементів у світі за 2019 рік (рис.2)[8].

Проаналізувавши отриману діаграму, спостерігаємо найбільший видобуток рідкісноземельних елементів в Китаї, який є на сьогодні імпортером цих елементів в інші країни світу.

Для створення економічного і екологічно чистого процесу вилучення РЗЕ із фосфогіпсу необхідні оптимізовані технологічні схеми [6]. Найбільш альтернативним методом отримання рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу є кислотне вилуговування,

що забезпечується використанням сульфатної, нітратної та хлоридної кислот. В даній роботі для одержання концентрату рідкісноземельних елементів використано кислотне вилуговування з додаванням нітратної кислоти різної концентрації.

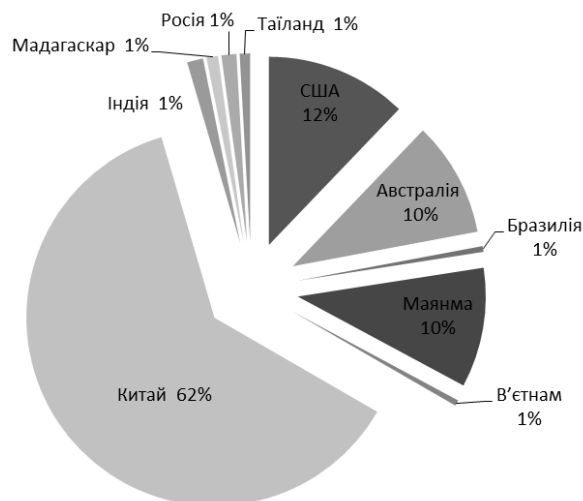


Рис. 2. Видобуток рідкісноземельних елементів у світі за 2019 рік

Постановка завдання. Мета статті - дослідити процес вилучення рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу шляхом взаємодії його із нітратною кислотою концентрацією 25, 30 і 35 %, при співвідношенні «фосфогіпс:кислота» 1:2 та температурі 70⁰С з одержанням очищеного кальцій сульфату з подальшим використанням його в будівельній промисловості та у сільському господарстві, а також вилучення з отриманого фільтрату осаду, що містить рідкісноземельні елементи.

Результати дослідження. Для проведення експериментальних досліджень складено лабораторну установку нітратнокислотної переробки фосфогіпсу з одержанням концентрату рідкісноземельних елементів (рис. 3)[10].

Дослідження проводили при співвідношенні «фосфогіпс:нітратна кислота» 1:2 наступним чином. В реактор 3, додавали 250 г фосфогіпсу, одержаного на підприємстві «Дніпровський завод мінеральних добрив» (м.Кам'янське) і заповнювали 500 см³ розчином нітратної кислоти концентрацією 25%, 30% та 35% відповідно. Після цього ємність з пульпою встановлювали на піч 4 та нагрівали протягом 30 хвилин при температурі 70⁰С з перемішуванням і барботажем повітря.

Через відведений час відкривали кран 6 і по трубці 5 через фільтр 7 відфільтровували осад і промивали водою. Рідкий фільтрат направляли на виділення з нього РЗЕ. Промиті осади виводили як готовий продукт – очищений кальцій сульфат. По закінченні експериментів визначали концентрацію рідкісноземельних елементів в фільтратах за допомогою титриметричного методу, а саме титруванням трилоном Б.

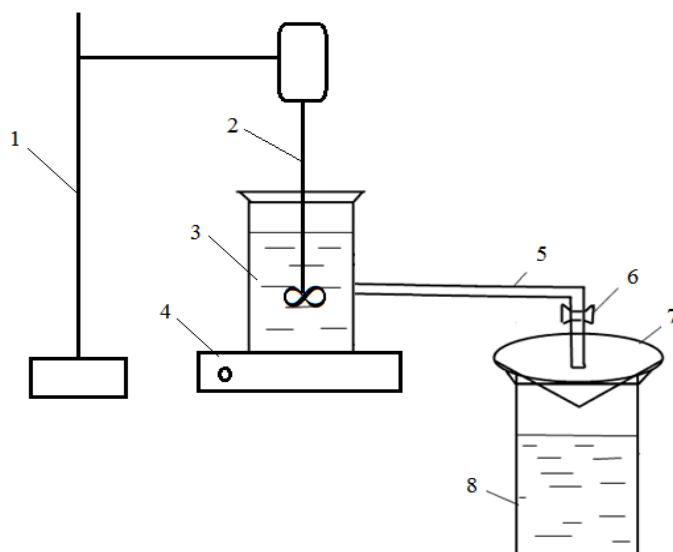


Рис. 3. Схема лабораторної установки нітратнокислотної переробки фосфогіпсу з одержанням концентрату рідкісноземельних елементів: 1 – штатив; 2 – вертикальна мішалка; 3 – реактор з пульпою; 4 – піч; 5 – з'єднувальна трубка; 6 – кран; 7 – фільтр; 8 – ємність з фільтратом

Для визначення концентрації РЗЕ у фільтратах до 20 см³ проби додавали 1 краплю розчину тимулового блакитного і розчин амоніаку до появи жовтого кольору [11]. Потім додавали буферний розчин рН = 6 та індикаторну суміш і титрували трилоном Б 0,05N до зміни забарвлення розчину з червоного на жовте.

Концентрації рідкісноземельних елементів (С) знаходили за формулою 1 [11]:

$$C = \frac{V_1 * 3,5}{V_2}, \quad (1)$$

де V_1 – об'єм трилону Б, що пішов на проби; V_2 – об'єм проби взятої для титрування.

Надалі до фільтратів, що містять рідкісноземельні елементи додавали амоній гідроксид до рН = 7,5-8. Осад, що містив концентрат РЗЕ промивали водою та виводили із системи як готову продукцію. Ступінь вилучення концентрату РЗЕ ε із зразків фосфогіпсу розраховували за формулою 2 [12]:

$$\varepsilon = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де m_1 – маса висушеного осаду, що містить РЗЕ, г; m_2 – маса взятого для експерименту фосфогіпсу, г.

Визначення концентрації рідкісноземельних елементів у фільтратах здійснювали із використанням формули 1:

$$\begin{aligned} 25 \% HNO_3 &= \frac{1,2 * 3,5}{20} = 0,21 \text{ г/дм}^3 \\ 30 \% HNO_3 &= \frac{8,5 * 3,5}{20} = 1,49 \text{ г/дм}^3 \\ 35 \% HNO_3 &= \frac{9,6 * 3,5}{20} = 1,68 \text{ г/дм}^3 \end{aligned}$$

Нижче наведено графік залежності вмісту РЗЕ у фільтратах від концентрації нітратної кислоти (рис.4).

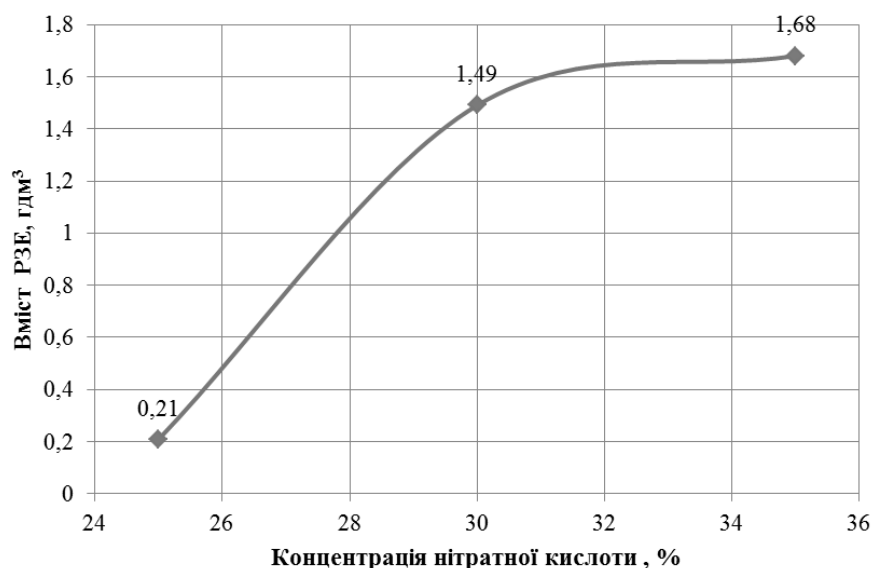


Рис. 4. Залежність вмісту РЗЕ у фільтратах від концентрації нітратної кислоти при температурі 70°C та співвідношенні «фосфогіпс : кислота» 1:2

Встановлено, що при підвищенні концентрації кислоти з 25 до 35 %, вміст рідкісноземельних елементів у фільтратах зразків підвищується з 0,21 до 1,68 г/дм³ відповідно.

Ступінь вилучення концентрату РЗЕ із зразків фосфогіпсу розраховано за формулою 2:

$$25 \% \text{HNO}_3 = \frac{57,2}{250} \cdot 100 = 22,88\%$$

$$30 \% \text{HNO}_3 = \frac{25,2}{250} \cdot 100 = 10,08\%$$

$$35 \% \text{HNO}_3 = \frac{24,7}{250} \cdot 100 = 9,88\%$$

Одержані результати експерименту зображені на рис. 5.

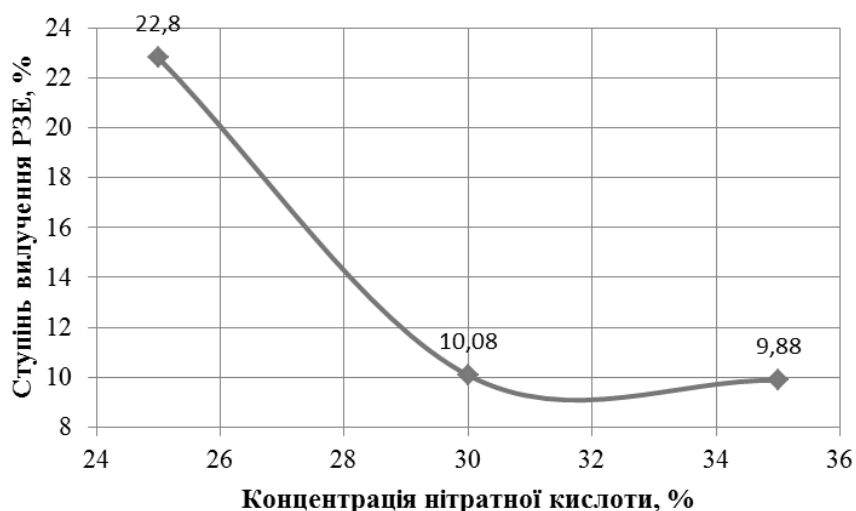


Рис. 5. Залежність ступеню вилучення концентрату РЗЕ від концентрації нітратної кислоти при температурі 70°C та співвідношенні «фосфогіпс : нітратна кислота» 1:2

Проаналізувавши графік, можна побачити, що ступінь вилучення концентрату РЗЕ із фосфогіпсу найвищий при концентрації кислоти 25 % і становить 22,8%, а з підвищенням концентрації HNO_3 він зменшується. Це явище можна пояснити тим, що при подачі більш концентрованої кислоти у ємність із пульпою у місці введення відбувається пересичення по іону гідрогену і в процесі розчинення фосфогіпсу рН системи знижується (менше 2). При цьому відбувається різкий перехід рідкісноземельних елементів у рідку фазу – кальцій нітрат, що призводить до втрат РЗЕ. Таким чином, найвищий ступінь вилучення концентрату рідкісноземельних елементів одержано при переробці фосфогіпсу розчином нітратної кислоти концентрацією 25%.

Отримавши результати, та проаналізувавши їх надалі експерименти продовжено з розчином нітратної кислоти концентрацією 25 % в залежності від температури нагрівання протягом 30 хвилин, а саме при 70,75 і 80 °С. Результати надано на рис. 6.

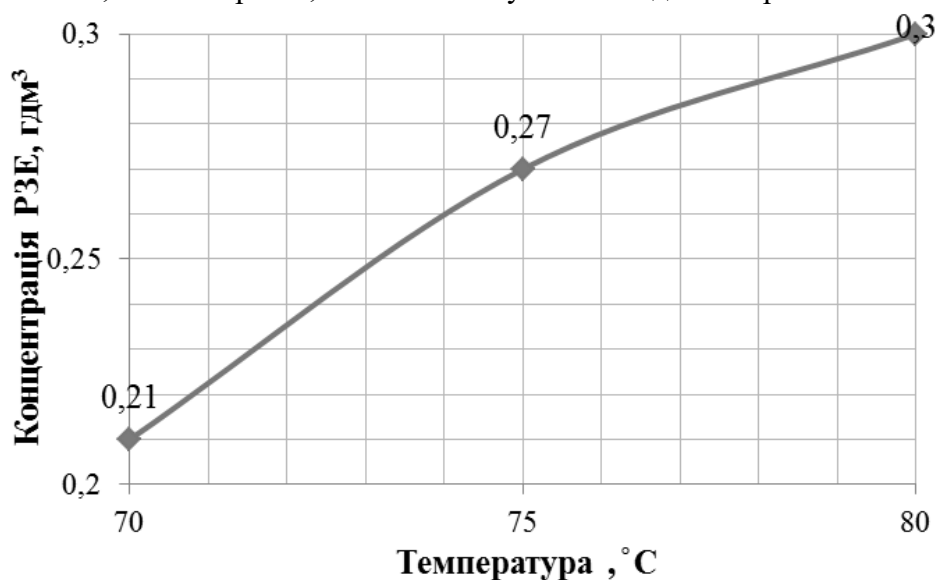


Рис. 6. Залежність концентрації РЗЕ від температури при відсотковій концентрації нітратної кислоти 25% та тривалості обробки 30 хвилин

На основі експериментальних даних встановлено, що в залежності від температури обробки протягом 30 хвилин при концентрації кислоти, що додається до фосфогіпсу 25%, концентрація рідкісноземельних елементів у зразках в незначній мірі підвищується з 0,21 до 0,3 г/дм³. Температуру 70°C рекомендовано до промислового впровадження.

Висновки. У ході дослідження встановлено, що при підвищенні концентрації кислоти з 25 до 35%, вміст рідкісноземельних елементів у фільтратах зразків підвищується з 0,21 до 1,68 г/дм³ відповідно. Виявлено, що ступінь вилучення концентрату РЗЕ із фосфогіпсу найвищий при концентрації кислоти 25% і становить 22,8%, з підвищенням концентрації HNO_3 він зменшується. Температуру вилуговування 70°C рекомендовано до промислового впровадження. Одержаний в ході дослідження очищений від рідкісноземельних елементів (нейтралізований) фосфогіпс рекомендовано використовувати у якості вторинної сировини замість природного гіпсу – у виробництві гіпсових в'язучих. Це дає можливість вирішити значну частину екологічних проблем виробництва мінеральних добрив.

Література

1. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург: УрГУПС, 2002. 463 с.
2. Пляцук Л.Д., Черниш Є.Ю., Алієва М.О. *Огляд проблематики комплексної переробки фосфогіпсу*. Освіта, наука та виробництво: розвиток і перспективи : матеріали II Всеукраїнської науково-методичної конференції. м.Шостка, 20 квітня 2017 р. С.17–18.
3. ТУ 6–08–418–81. Фосфогіпс для сільськогосподарського господарства.
4. Карпович Е.О., Вакал С.В., Золотарьов О.Е., Шарапов С.В., Соколович С.О.. Спосіб одержання гіпсового в'язучого: пат. 36150 Україна: МПК С 01 В 25/00. № u200807228, заявл. 26.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19. 3 с.
5. Трунова И.А., Сидоренко Р.В. Анализ основных направлений утилизации фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты. *Екологічна безпека*. 2010. № 2. С. 31–35.
6. Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/22/105670>.
7. New study concerning development of application of rare earth metals in steels. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838805005815>.
8. U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey, 200 p. Режим доступа: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.
9. Leaching of rare earth elements (REEs) and impurities from phosphogypsum: A preliminary insight for further recovery of critical raw materials. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619304937>.
10. Nazarenko O.V., Ivanchenko A.V. Research on technology of complex processing of phosphogypsum. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, № 5. P.109 –114. Режим доступа: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-5/109>.
11. Умланд Ф., Янсен А., Тириг Д., Вюнш Г. Комплексные соединения в аналитической химии. М.: Мир, 1975. 531 с.
12. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа. Под. ред. А.А. Ищенко. М.: «Академия», 2014. 352 с.

References

1. Lotosh V.E.(2002). *Recycling of environmental waste*. Yekaterinburg. [in Russian].
2. Plyatsuk L.D., Chernish Є. Yu., & Alinva M.O. (2017). Review of the problematics of complex processing of phosphogypsum. *Osvita, science and technology: development and prospects: materials of the All-Ukrainian Science and Methodological Conference* (20 april 2017) (pp.17–18). Sumy [in Ukraine].
3. TU 6–08–418–81. Phosphogypsum for agriculture [in Russian].
4. Karpovych E.O., Vakal S.V., Zolotariov O.Y., Sharapov S.V., Sokolovych S.O., inventors (2008). Process for the preparation of gypsum binder from phosphogypsum. Ukrainian patent, no. 36150.
5. Trunova I.A., Sidorenko R.V. (2010). Analysis of the main directions of utilization of phosphogypsum – a waste product of phosphoric acid. *Ecological bezpeka* 2, pp. 31–35 [in Ukraine].
6. Access mode: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/22/105670>.
7. New study concerning development of application of rare earth metals in steels. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838805005815>.
8. U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey, 200 p. Access mode: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.
9. Leaching of rare earth elements (REEs) and impurities from phosphogypsum: A preliminary insight for further recovery of critical raw materials. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619304937>.
10. Nazarenko O.V., Ivanchenko A.V. (2020). Research on technology of complex processing of phosphogypsum. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5. pp.109 –114. Access mode: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-5/109> [in Ukraine].
11. Umland F., Jansen A., & Tirig D., & Wünsch G. (1975). Complex compounds in analytical chemistry. Moscow: Mir [in Russian].
12. Ishchenko A.A. (Eds.) (2014) *Analytical chemistry and physicochemical methods of analysis*. Moscow: "Academy" [in Russian].

NAZARENKO OLENA

e-mail: na3arenko.elena@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5908-9589.

Department of Chemical technology of inorganic
substances of the
Dnipro State Technical University

IVANCHENKO ANNA

e-mail: ivanchenkodgtu@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1404-7278.

Department of Chemical technology of inorganic
substances of the
Dnipro State Technical University

KOLESNIKOVA ALEXANDRA

e-mail: alyakolesnikova7@gmail.com

Department of Chemical technology of inorganic substances of the
DniproStateTechnicalUniversity

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИТРАТНОКИСЛОТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОГИПСА С ПОЛУЧЕНИЕМ КОНЦЕНТРАТА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

НАЗАРЕНКО О.В., ИВАНЧЕНКО А.В., КОЛЕСНИКОВА А. Ю.

Днепровский государственный технический университет

Цель. Исследовать процесс извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса путем взаимодействия его с азотной кислотой, концентрацией 25, 30 и 35%, при соотношении «фосфогипс кислота» 1: 2 и температуре 70⁰С с получением очищенного кальций сульфата.

Методика. Получена лабораторная установка азотно-кислотной обработки фосфогипса с получением концентрата редкоземельных элементов. Экспериментальные исследования проводили с применением титриметрического метода с использованием трилона Б для определения концентрации редкоземельных элементов в полученных фильтрах.

Результаты. На основе полученных данных установлено, что при повышении концентрации кислоты с 25 до 35%, содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в фильтрах образцов повышается с 0,21 до 1,68 г/дм³ соответственно. Установлено, что степень извлечения концентрата РЗЭ из фосфогипса высокий при концентрации кислоты 25% и составляет 22,8%, а с повышением концентрации HNO₃ он уменьшается почти в 2,5 раза. Определена оптимальная концентрация раствора азотной кислоты, которая составляет 25% и взаимодействует с фосфогипсом для последующего извлечения осадка редкоземельных элементов. Выявлено оптимальную температуру нитратнокислотной переработки фосфогипса, которая составляет 70⁰С.

Научная новизна. Установлены закономерности процесса извлечения концентрата редкоземельных элементов из фосфогипса кислотным выщелачиванием. Научно обосновано использование азотной кислоты для получения редкоземельных элементов из фосфогипса и получения осадка очищенного фосфогипса от растворимых примесей.

Практическая значимость. Определено содержание редкоземельных элементов в фильтрате при различной концентрации кислоты. Установлена эффективность извлечения осадка редкоземельных элементов из фосфогипса путем взаимодействия с азотной кислотой концентрацией 25, 30 и 35% соответственно. Очищенный фосфогипс в дальнейшем может быть использован для получения гипсового вяжущего в строительной промышленности и в технологии получения удобрений в сельском хозяйстве. Концентрат редкоземельных элементов может применяться в медицине, металлургии и других отраслях как с выделением отдельных элементов так и в целом.

Ключевые слова: фосфогипс, концентрат редкоземельных элементов, нитратнокислотная обработка, фильтрат, концентрация

STUDY OF THE PROCESS OF NITRATIC ACID PROCESSING OF PHOSPHOGYPSUM TO OBTAIN A CONCENTRATE OF RARE-EARTH ELEMENTS

NAZARENKO O.V, IVANCHENKO A.V, KOLESNIKOVA A.Yu.

Dnipro State Technical University

Purpose. Investigate the process of extraction of rare earth elements from phosphogypsum by its interaction with nitric acid, concentration 25, 30 and 35%, at a ratio of "phosphogypsum: acid" 1: 2 and a temperature of 70⁰C to obtain purified calcium sulfate.

Methodology. Regularities of the process of extraction of concentrate of rare earth elements from phosphogypsum by acid leaching are obtained. Experimental studies were performed using the titrimetric method using Trilon B to determine the concentration of rare earth elements in the obtained filtrates.

Findings. A review of scientific and technical literature in the field of promising methods of processing phosphogypsum. The most alternative method of processing phosphogypsum is to obtain rare earth elements by acid leaching, which is provided by the use of mineral acids. Based on the obtained data, it was found that when the acid concentration increases from 25 to 35%, the content of rare earth elements (REE) in the filtrates of the samples increases from 0.21 to 1.68 g/dm³, respectively. It was found that the degree of extraction of REE concentrate from phosphogypsum is highest at an acid concentration of 25% and is 22.8%, and with increasing concentration of HNO₃, it decreases by almost 2.5 times. The optimal concentration of the nitric acid solution was determined, which is 25% and interacts with phosphogypsum for the subsequent extraction of the precipitate of rare earth elements. The optimal temperature of nitric acid processing of phosphogypsum, which is 70⁰C, was revealed.

Originality. Regularities of the process of extraction of concentrate of rare earth elements from phosphogypsum by acid leaching are obtained. The use of nitric acid for the production of rare earth elements from phosphogypsum and for the production of purified phosphogypsum sediment from soluble impurities scientifically substantiated.

Practicalvalue. The content of rare earth elements in the filtrate was determined at various acid concentrations. The efficiency of sediment removal of rare earth elements from phosphogypsum by interaction with nitric acid at a concentration of 25, 30 and 35%, respectively, was established. Purified phosphogypsum can then be used to produce gypsum binder in the construction industry and in fertilizer technology in agriculture. Concentrate of rare earth elements can be used in medicine, metallurgy and other industries with the selection of individual elements and in general.

Key words: phosphogypsum, concentrate of rare earth elements, nitric acid treatment, filtrate, concentration