

УДК 620.91:621.31

ШАВЬОЛКІН О.О., ШВЕДЧИКОВА І.О., КРУГЛЯК Г.В.,
МАРЧЕНКО Р.М., ПІСОЦЬКИЙ А.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

**РОЗРОБЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ
УПРАВЛІННЯ МІКРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ
ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Мета. Розробка експериментальної установки для випробувань програмно-апаратних засобів управління фотоелектричною системою підключеного до мережі локального об'єкта, що поряд з перевіркою працездатності дозволить здійснити аналіз роботи та коригування налаштування систем з різними параметрами за різних погодних умов, графіків навантаження та режимів роботи.

Методика. Експериментальні дослідження з попереднім обґрунтуванням налаштувань за даними розрахунків та імітаційного моделювання в програмі Matlab.

Результати. Розроблено структуру та виготовлено експериментальну установку на базі фотоелектричної системи з акумуляторним накопичувачем і використанням емулятору фотоелектричної батареї з програмним керуванням генерацією та потужністю навантаження. Розроблено програмні модулі системи. За результатами імітаційного моделювання визначені моменти часу, коли в експериментальній установці здійснюється перемикання режиму роботи. Здійснено випробування експериментальної установки в статичному та динамічному режимах. Статичні випробування спрямовані на перевірку функціонування емулятору фотоелектричної батареї згідно заданих значень потужності сонячного випромінювання і температури фотомодуля, а також на перевірку коректності використаної в програмі моделі. Випробування в статистиці за фіксованих параметрів та в динаміці у добовому циклі, в цілому, підтвердили працездатність запропонованих рішень.

Наукова новизна. Отримав розвиток метод експериментальних досліджень у добовому циклі засобів управління фотоелектричними системами з використанням програмно керованих емулятору фотоелектричної батареї та навантаження з масштабуванням за потужністю. Це поряд з прискоренням експерименту дозволяє оцінювати ефективність випробуваних систем за різних співвідношень параметрів систем і коригувати алгоритми функціонування.

Практична значимість. Запропоновані рішення щодо реалізації експериментальної установки дозволяють мінімізувати матеріальні витрати та витрати часу в процесі випробувань та розробки програмно-апаратних засобів управління фотоелектричною системою з акумуляторним накопичувачем.

Ключові слова: програмно-апаратний засіб, експериментальна установка, підключена до мережі фотоелектрична система, акумулятор, емулятор фотоелектричної батареї з програмним керуванням, випробування, багатозонна тарифікація, добовий цикл.

Вступ. Для забезпечення стійкого електропостачання локальних об'єктів (ЛО) все частіше використовують мікроенергетичні мережі на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Використання ВДЕ дозволяє зменшити витрати на електроенергію та підвищити потужність електрообладнання в умовах обмежених можливостей розподільчих мереж та за наявності ліміту на енергоспоживання (від енергосистеми). Питання генерації електроенергії в мережу за «зеленим тарифом» за таких умов не є визначальним [1].

На практиці найбільше поширення набули мікроенергетичні мережі на основі фотоелектричних систем (ФЕС) з акумуляторними батареями (АКБ) та з підключенням до централізованої розподільчої мережі змінного струму (РМ). За наявності сприятливих кліматичних умов до ФЕС додаються вітрогенерувальні установки. Використання АКБ

підвищує вартість системи, але забезпечує безперебійне живлення споживачів ЛО. Крім того, за наявності АКБ при нерівномірному графіку генерації енергії ВДЕ з'являється можливість вирівнювання графіка навантаження об'єкта. Значні можливості перерозподілу енергії в системі і зниження витрат на споживану електроенергію з'являються при підключенні до мережі з багатозонною тарифікацією [2].

Ефективність функціонування мікроенергетичної мережі на основі ВДЕ забезпечує система управління енергоспоживанням, генерацією та перерозподілом електроенергії в нормальному та аварійному режимах роботи, що реалізується інтелектуальними програмно-апаратними засобами. В процесі розробки та удосконалення таких достатньо складних рішень розповсюджено використання імітаційного моделювання на персональному комп'ютері (ПК) [2, 3]. Але, навіть за наявності близьких до реальних пристроїв математичних моделей, це слід розглядати як попередній етап, бо відсутня перевірка апаратних рішень. Отже, найбільш ефективним інструментом є експеримент. Натурний експеримент та випробування на реальному об'єкті передбачають значні матеріальні витрати та витрати часу, пов'язані зі сезонністю погодних умов. Тому актуальною є розробка експериментальних установок з програмним керуванням (ЕУПК) для дослідження та випробування систем. За цього доцільним виглядає використання імітаційно-фізичного моделювання, коли окремі компоненти системи замінюються імітаторами. Оскільки системи мають різні потужності, режими роботи та навантаження, такі ЕУПК повинні забезпечувати масштабування за потужністю у добовому циклі роботи ЛО.

Аналіз попередніх досліджень. Останнім часом експериментальні установки з використанням емуляторів (імітаторів) реальних пристроїв на базі напівпровідникових перетворювачів енергії широко використовуються дослідниками і виробниками інверторів [4], це стосується навіть емуляторів електромеханічних пристроїв [5]. В ФЕС це відноситься до емуляторів фотоелектричної батареї (ФБ), які дозволяють адекватно оцінити ефективність, надійність і продуктивність інвертора (ІН) для скорочення періоду його розробки. При розробленні та експериментальному тестуванні фотоелектричних перетворювачів достатньо часто потрібні повторювані умови тестування, щоб обґрунтувати їх алгоритми управління [5]. Це стосується також розроблення МРРТ контролерів, коли за допомогою емулятору відтворюються різні погодні умови, раптове затінення ФБ тощо. На сьогодні відомі різноманітні емулятори ФБ [6-9], характеристики яких максимально наближені до реальних ФБ, деякі з них вже є комерційно доступними [9].

Постановка завдання. Налагодження і коригування програмного забезпечення, перевірка функціональної працездатності програмно-апаратних засобів в умовах різних ЛО вимагає значних матеріальних витрат і витрат часу. Характер навантаження різних ЛО може мати відчутні відмінності і змінюватися від сезону року і погоди. Для мінімізації витрат на проведення експериментальних випробувань доцільним є створення ЕУПК, реалізованої у певному масштабі, яка буде включати в себе всі елементи ФЕС і, безпосередньо, навантаження ЛО, що дозволить:

- використовувати обладнання ФЕС (ФБ, інвертор, АКБ, навантаження) меншої потужності;
- не залежати від погодних умов, використовуючи емулятор ФБ і дані метеопрогнозу;

- задавати різні за величинами потужності навантаження та формувати довільні за характером графіки навантаження;

- реалізовувати будь-які сценарії управління електроспоживанням.

Мета роботи полягає у розробленні експериментальної установки для випробувань програмно-апаратних засобів управління ФЕС підключеного до мережі ЛО, яка дозволить реалізувати роботу у різних погодних умовах при різних графіках навантаження та в різних режимах роботи.

Задачі для вирішення:

- обґрунтування та розробка структури експериментальної установки;

- розробка програмних модулів системи;

- виготовлення, налаштування параметрів та перевірка працездатності установки;

- здійснення випробування в статиці за фіксованих параметрів сонячної генерації, ступеню заряду АКБ, навантаження у межах їхніх можливих значень з перевіркою коректності даних вимірювань;

- здійснення випробування в динаміці у добовому циклі згідно з попередньо розрахованими значеннями за використанням імітаційного моделювання.

Результати дослідження. На даному етапі робіт розглядалось питання створення ЕУПК для ФЕС, що призначені для забезпечення лише власних потреб ЛО без генерації електроенергії в РМ за багатозонною тарифікацією оплати. За цього програмно-апаратні засоби управління ФЕС з АКБ вирішують питання управління генерацією, споживанням та перерозподілом енергії між тарифними зонами з мінімізацією витрат на оплату споживання електроенергії з РМ. Це рішення виглядає цілком доречним, оскільки у часи пікового навантаження (зранку та ввечері), а також більшу частину денного часу ФЕС працює автономно. До того ж в разі «слабких» мереж за цього забезпечуються стандартні показники якості напруги споживачів. Рішення базується на використанні стандартного гібридного інвертору (ІН) Ахіома Energy ISMPPT 3000 (3 кВА) з вбудованим MPPT контролером для підключення ФБ і контролером заряду АКБ.

Загальна структура ЕУПК (рис. 1) містить ПК, блок програмного керування (БК), набір АКБ (GB) типу RITAR RT12140H з напругою 12 В і ємністю C_B 12 А·год, емулятор ФБ (PVE), блок вимірювання з датчиками струму (ДС) та напруги (ДН). PVE отримує живлення від РМ і підключений до ІН через реле К6, що шляхом відключення на певний час PVE забезпечує можливість регулювання генерації енергії. Потреба в цьому виникає внаслідок обмеженої ємності АКБ. Окрім того, зарядна характеристика АКБ у разі заряду в три стадії, що реалізується контролером заряду, має «активну» зону, коли струм заряду I_B обмежується тільки максимальним значенням ступеню заряду $Q^* = Q/Q_{НОМ} \leq 80\%$ ($Q_{НОМ}$ – номінальний заряд АКБ). У подальшому за $Q^* > 80\%$ значення I_B різко зменшується, і АКБ здатна прийняти лише обмежену енергію. Така ситуація виникає за малого навантаження, коли зайву енергію, що генерується ФБ нікуди дівати. Отже, в цьому разі за досягненням $Q^* \geq 80\%$ PVE відключається, що призводить до розряду АКБ через ІН на навантаження і зменшенню Q^* . За значенням $Q^* \leq 75\%$ підключення PVE відновлюється з наступним зарядом АКБ.

Навантаження ЕУПК складається з п'яти ламп розжарювання (L1-L5) різної потужності з індивідуальним підключенням (блок реле (K1-K5)). Програмне перемикання

комбінацій ламп дозволяє сформувати необхідний графік змінювання потужності навантаження у часі. Всі функції програмного керування здійснює БК з ПК. БК містить низку контролерів, що реалізовані на платформі Arduino. Їхнє програмування згідно заданим умовам здійснюється через ПК. За цього реалізуються наступні функції:

- формування залежності в часі для сонячної радіації $G(t)$ і температури повітря $t_{ai}(t)$, згідно яким визначається генерація PVE;
- формування графіку потужності навантаження $P_H(t)$;
- отримання та обробка даних вимірювань;
- керування режимом роботи: нормальний автономний з живленням навантаження ЛО від ІН; живлення навантаження від РМ з одночасним зарядом АКБ від РМ і ФБ; аварійний автономний у разі відсутності напруги в РМ;
- керування реле К6 з можливістю відключення PVE від ІН (зазвичай це функція передається програмно-апаратному засобу, що досліджується);
- імітація роботи метеосайту з використанням wi-fi модуля, що формує стандартний файл метеопрогнозу з визначеними даними для програмно-апаратних засобів, які використовують в роботі звернення до метеосайту для визначення рекомендацій щодо графіка навантаження.

Масштабування параметрів ФЕС. Згідно даним Європейської геоінформаційної бази даних PVGIS [10] для ФБ з номінальною потужністю $P_{ФБНОМ}=500$ Вт для ясного дня червня в Києві максимальне значення потужності, що генерується ФБ о 12-й годині, становить $P_{ФБМАХ}=384$ Вт (табл. 1), відносно значення $P^*_{ФБМАХ}=0,768$. Загальна добова генерація енергії $W_{ФБ}$ складає 3019,2 Вт·год, середньодобова потужність генерації ФБ $P_{ФБСД}=W_{ФБ}/24=125,8$ Вт (відносно значення $P^*_{ФБСД}=P_{ФБСД}/P_{ФБНОМ}=0,252$), середня за світловий день потужність генерації ФБ $P_{ФБСДН}=W_{ФБ}/12=251,6$ Вт (відносно значення $P^*_{ФБСДН}=P_{ФБСДН}/P_{ФБНОМ}=0,50$).

Максимальна потужність емулятору установки $P_{PVEМАХ}=480$ Вт і відносно $P_{ФБМАХ}=384$ Вт становить $P_{PVEМАХ}/P_{ФБМАХ}=1,25$. Це еквівалентно ФБ з потужністю $P_{ФБНОМ}=625$ Вт, відповідно, значення $P_{ФБСД}=157,5$ Вт і $P_{ФБСДН}=312,5$ Вт.

За ємності АКБ $C_B=36$ А·год, напрузі $U_B=24$ В і в разі ККД $\eta_B=0,9$ її енергія $W_B=U_B \cdot I_B \cdot \eta_B=24 \cdot 36 \cdot 0,9=778$ Вт·год. Для більшості типів гелевих АКБ, що використовуються в ФЕС, без суттєвого зменшення терміну експлуатації припускається ступінь розряду на 30-50%, у літій-іонних АКБ – до 80-90%. Якщо енергія АКБ використовується для живлення навантаження в години вечірнього піка, коли сонячна генерація відсутня, при розряді на 30% – $W_{B1}=0,3W_B=233$ Вт·год, при розряді на 50% – $W_{B2}=0,5W_B=389$ Вт·год. За тривалості розряду 2 години з урахуванням ККД перетворювача на рівні $\eta_B=0,94$ маємо потужність, відповідно, $P_1=110$ Вт і $P_2=183$ Вт. У разі гелевих АКБ є можливість забезпечувати живлення навантаження ЛО з потужністю $P_{НС}$ на рівні середньодобової генерації ФБ ($P_{НС} \approx P_{ФБСД}$) без споживання електроенергії з РМ. В разі використання більш дорогих літій-іонних АКБ потужність можна підвищити або зменшити ємність і, відповідно, вартість. Отже, в даному разі маємо співвідношення потужностей $P_{ФБНОМ}/P_{АКБНОМ}=0,8:1$. Відповідно, за $P_{ФБНОМ}=20$ кВт значення $P_{АКБНОМ}=25$ кВт. Співвідношення можна змінити шляхом зменшення ємності АКБ – замість трьох гілок GB на рис.1 використати 2 гілки. Струм ФБ I_B є пропорційним

сонячній радіації $G(t)$ і майже не залежить від температури фотомодуля, тому можливість зменшення $P_{ФБНОМ}$ в k разів досягається відповідним зменшенням значення $G(t)$.

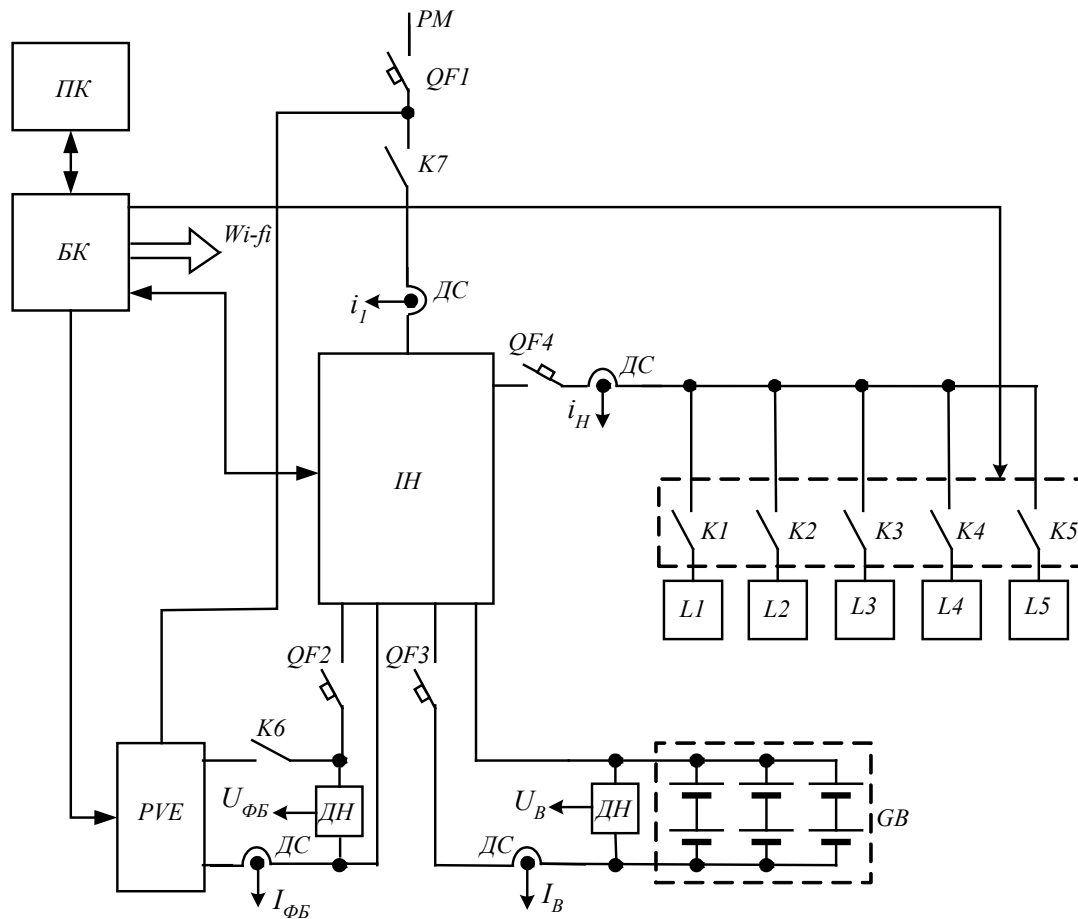


Рис.1. Структура експериментальної установки

Ефективність роботи ФЕС доречно оцінювати згідно витратам за спожити з РМ електроенергію. Для цього можна використати відносний показник $K_E = B_1/B_2$ (B_1 – загальна вартість електроенергії, що споживається навантаженням ЛО; B_2 – вартість електроенергії, що споживається ЛО з РМ). Гібридний ІН, який застосовано в установці, має потужність $P_{IH}=3000$ Вт, що значно перевищує потужність PVE. За цього слід враховувати потужність, що споживається власно перетворювачем P_B (блок живлення, вентилятор), і є достатньо великою. У автономному режимі P_B споживається від ФБ та АКБ, її вимірне значення становить $P_{ВП}=35$ Вт, у разі підключення навантаження до мережі (за відсутності генерації ФБ і повністю зарядженому АКБ ($I_B \approx 0$)) значення потужності $P_{ВМ}$ дещо більше та становить $P_{ВМ}=46$ Вт. Якщо прийняти $P_{ФБНОМ}=300$ Вт, то з урахуванням масштабування за потужністю ($P_{IH}/P_{ФБНОМ}=3000/300$) P_B слід перерахувати до таких значень: $P_{ВП}=3,5$ Вт, $P_{ВМ}=4,6$ Вт.

Приймаємо умовне співвідношення тарифів: пікові часи $T_{II}=1,5$ (ранковий з $t_{II\text{P}}=7.00$ до $t_{II\text{P}}=11.00$, вечірній з $t_{II\text{B}}=20.00$ до $t_{II\text{B}}=22.00$); денний $T_{II}=1,0$ (з $t_{II\text{D}}=11.00$ до $t_{II\text{D}}=20.00$); нічний $T_{II}=0,4$ (з $t_{II\text{H}}=22.00$ до $t_{II\text{H}}=7.00$). За цього згідно поточним (вимірюваним) значенням потужності навантаження P_H і потужності P_I , що споживається з РМ, на відповідних інтервалах часу можна записати:

$$B_1 = 0,4 \int_{t_{II\text{H}}}^{t_{II\text{H}}} P_H dt + 1,0 \int_{t_{II\text{D}}}^{t_{II\text{D}}} P_H dt + 1,5 \left(\int_{t_{II\text{P}}}^{t_{II\text{P}}} P_H dt + \int_{t_{II\text{B}}}^{t_{II\text{B}}} P_H dt \right) \quad (1)$$

$$B_2 = 0,4 \int_{t_{II\text{H}}}^{t_{II\text{H}}} (P_1 - P_{BM} + P_{BM1}) dt + 1,0 \int_{t_{II\text{D}}}^{t_{II\text{D}}} [(P_1 - P_{BII} + P_{BII1})p + (P_1 - P_{BM} + P_{BM1})m] dt + \\ + 1,5 \left(\int_{t_{II\text{P}}}^{t_{II\text{P}}} P_{BII1} dt + \int_{t_{II\text{B}}}^{t_{II\text{B}}} P_{BII1} dt \right), \quad (2)$$

де $(P_1 - P_{BM})$ і $(P_1 - P_{BII})$ – визначає потужність, спожиту з РМ за винятком фактичного значення власних потреб; p – змінна, що дорівнює 1 за роботи в автономному режимі (на інших інтервалах часу – 0); m – змінна, що дорівнює 1 за підключення до мережі.

Статичні випробування стосувались перевірки функціонування емулятору ФБ згідно заданих значень потужності сонячного випромінювання $G_i(t)$ і температури фотомодуля t_{fi} в i -ту годину світлового дня, а також коректності використаної в програмі моделі. За цього для знаходження потужності сонячної радіації в ясні дні $G_i(t)$ використовувалася база даних PVGIS сайту [10]. Температура фотомодуля t_{fi} визначалася за формулою:

$$t_{fi} = t_{ai} + (t_{NOCT} - 20^\circ\text{C}) \frac{G_i}{800} \quad (3)$$

де t_{NOCT} – температура фотомодуля для режиму $NOCT$ (Normal Operating Cell Temperature) або нормального функціонування за умови $G_{NOCT}=800$ Вт/м² (datasheet); t_{ai} – температура навколишнього середовища.

Результати розрахунку потужності P_{PVi} сонячної генерації для ясного дня (15 червня 2011 р.) наведені в табл. 1. Для розрахунку P_{PVi} були використані дані, що надає виробник для сонячних панелей типу LDK-245-20 [11]. В табл. 1 також наведені дані сайту [10] щодо потужності P_{PVGISi} генерації енергії фотомодулем потужністю 0,5 кВт для цього ж дня.

Зовнішній вигляд експериментального стенду показаний на (рис. 2). Перевірка установки здійснювалась в два етапи. Спочатку випробування проводилися в статичному, а потім в динамічному режимі. В нормальному автономному режимі при випробуваннях в статистиці задавалися фіксовані значення сонячної радіації та температури повітря за умови $P_{\text{ФБ}}=P_H$ у всьому діапазоні змінювання потужності $P_{\text{ФБ}}$. За цього АКБ не приймає участі в енергетичному процесі і її струм близький до 0. Потім навантаження збільшувалося або зменшувалося, що призводило до розряду або заряду АКБ. Вимірювані значення струмів та напруги також контролювалися додатковими приладами. Використано цифровий мультиметр

UNI-T UTM 39B (UT 39B). В режимі підключення до мережі контролювалися параметри заряду АКБ.

Таблиця 1

Результати розрахунку сонячної генерації

Час GMT+3	G_i , Вт/м ²	t_{fi} , °C	P_{PVi} , Вт	P_{PVGISi} , Вт	Похибка, %
07:00	56,93	25,78	29,55	31,06	+5,1
08:00	246,91	31,7	126,03	124,84	-0,9
09:00	424,79	37,27	213,6	217,88	+2,0
10:00	593,14	42,5	293,0	292,29	-0,24
11:00	729,7	46,8	356,1	344,92	-3,2
12:00	812,67	49,4	393,5	384,37	-2,3
13:00	802	49,06	388,5	375,4	-3,5
14:00	781,09	48,4	379,1	360,16	-5,2
15:00	658,83	44,58	323,8	315,99	-2,47
16:00	539,53	40,86	268,3	257,6	-4,1
17:00	332,02	34,37	168,5	170,12	+0,9
18:00	145,17	28,53	75,0	73,1	-2,6
19:00	58,2	25,82	30,31	31,80	+4,9

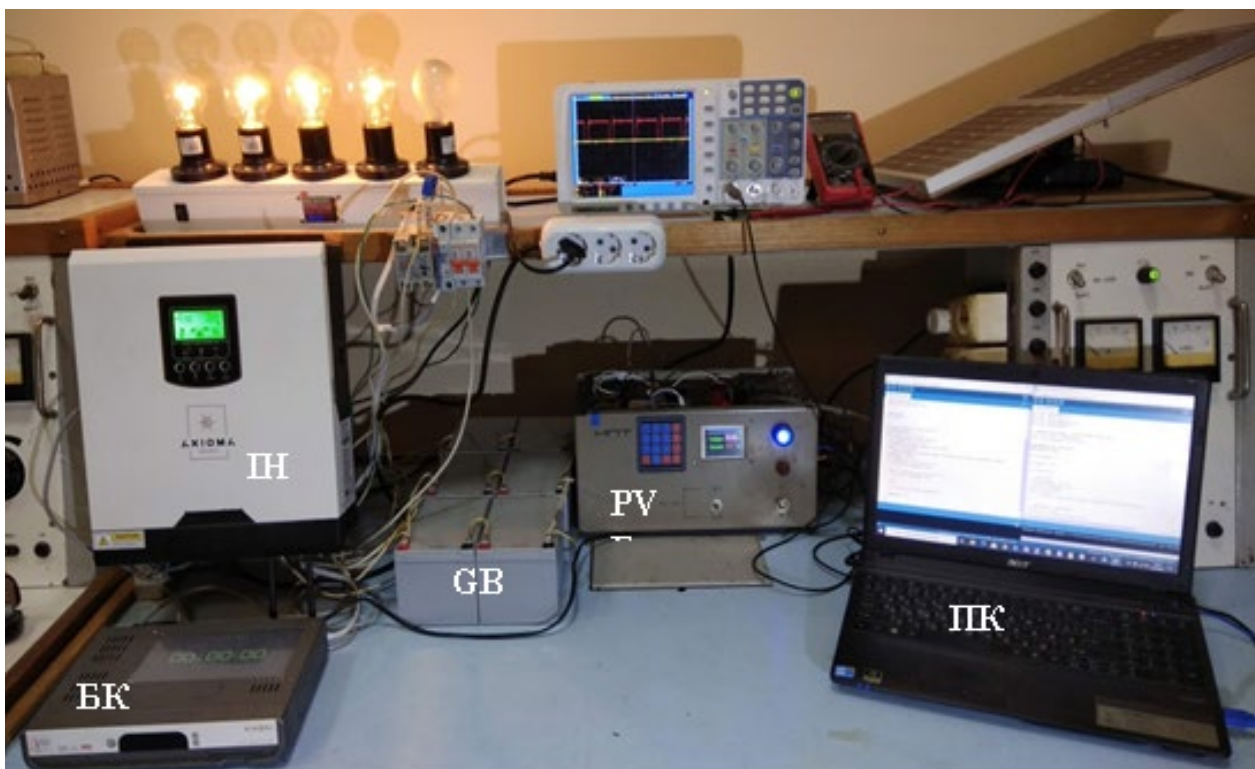


Рис.2. Зовнішній вигляд експериментальної установки

Випробування в динаміці передбачають дослідження роботи установки у добовому циклі. Оскільки БК не передбачає функцій визначення режиму роботи і підтримання ступеню заряду АКБ в заданих межах, то завдання функціонування було дещо спрощено.

Попередньо здійснено імітаційне моделювання установки в Matlab (за фактичних параметрів PVE, АКБ, навантаження) з визначенням графіку навантаження, за якого регулювання генерації ФБ не потрібно, і параметри (ступінь заряду та струми АКБ) не виходять за встановлені межі. За цього значення сонячної радіації в табл. 1 пропорційне зменшені і становлять 53 %.

На рис. 3 наведені отримані при імітаційному моделюванні осцилограми: P_I – потужності, що споживається з мережі, $P_{ФБ}$ – потужності ФБ, P_H – потужності навантаження, Q^* – ступеню заряду АКБ, I_B – струму АКБ (у масштабі $10I_B$), що відпрацьовується контролером заряду.

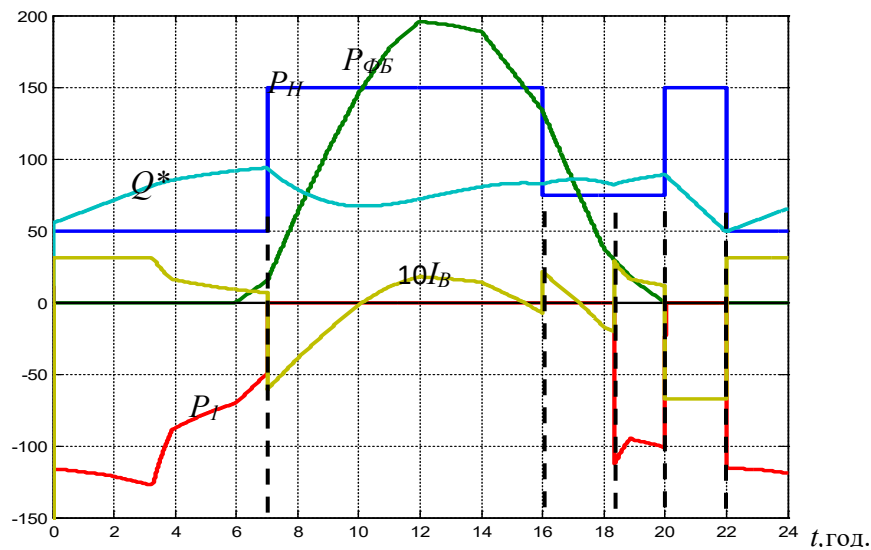


Рис. 3. Осцилограми для добового циклу роботи ФЕС

За результатами імітаційного моделювання були визначені моменти часу, коли в експериментальній установці здійснюється перемикання режиму роботи (пунктир на рис. 3). За результатами моделювання значення коефіцієнту ефективності K_E склало $K_E=4,5$. На даній стадії роботи за перевіркою функціональної працездатності ЕУПК завдання оцінки ефективності ФЕС не ставилося.

Висновки. Розроблена експериментальна установка фотоелектричної системи з акумуляторним накопичувачем і емулятором ФБ з програмним керуванням генерацією та потужністю навантаження для проведення випробувань програмно-апаратного комплексу управління електроспоживанням в мікроенергетичних мережах ЛО. В даний час ведуться роботи з підготовки експериментальної установки до проведення таких випробувань в рамках наукових проєктів, які реалізуються за підтримки Міністерства освіти та науки України: держбюджетної теми «Розроблення системи енергоефективного управління мікроенергетичними мережами локальних об'єктів з традиційними та поновлюваними джерелами» (№ держреєстрації 0118U000232) та науково-технічної роботи «Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у системах енергоменеджменту локальних об'єктів» (№ держреєстрації 0119U103640), що виконується за державним замовленням. Напрямок подальших досліджень є розширення можливостей ЕУПК,

що пов'язано з розробкою і додаванням до її структури емулятору вітрогенерувальної установки.

Література

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії: Закон України від 21.07.2020. № 810-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>;
2. Shavolkin O. Simulation model of the photovoltaic system with a storage battery for a local object connected to a grid with multi-zone tariffication / O. Shavolkin, I. Shvedchykova, S. Demishonkova // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine. – 2020. P. 368-372. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9160112>.
3. Обухов С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 38–51;
4. Воронцов А. Особенности построения имитаторов бортовых систем электроснабжения / А. Воронцов, П. Заика // Силовая электроника – 2016. – № 3. – С. 90-93;
5. Старостін С.С. Випробування систем електропривода з імітацією технологічного навантаження / С.С. Старостін // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2016. – Випуск 4. – С.38-43;
6. Шкуратов А.В. Формирователь аналоговых вольт-амперных характеристик для имитатора солнечной батареи / А.В. Шкуратов, А.В. Петровский // Доклады ТУСУР. – 2018. – Том 21, № 3. – С. 93-97;
7. Zhongfu Zhou, John Macaulay. An Emulated PV Source Based on an Unilluminated Solar Panel and DC Power Supply / Zhongfu Zhou, John Macaulay // Energies. – 2017. – Volume 10, Issue 12. –P. 2075-2095;
8. Vergura S. A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of PV Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation / S. Vergura // Energies. – 2016. – No. 9. – P. 326-338;
9. E4362A Solar Array Simulator DC Module, 130V, 5A, 600W. URL: <https://www.keysight.com/en/pd-1370040-pn-E4362A/solar-array-simulator>

References

1. O vnesenii zmín do deyakikh zakonov Ukrainy udoskonalennya umov підтримки виробництва електричної енергії за альтернативних джерел енергії: Закон України від 21.07.2020. № 810-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text> [in Ukrainian];
2. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., & Demishonkova, S. (2020). Simulation model of the photovoltaic system with a storage battery for a local object connected to a grid with multi-zone tariffication. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 368 – 372. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9160112> [in English];
3. Obuhov, S.G., Plotnikov, I.A. (2017). *Imitacionnaya model rezhimov raboty avtonomnoj fotoelektricheskoy stancii s uchetom realnyh uslovij ekspluatacii* [A simulation model of the operating modes of an autonomous photovoltaic power plant taking into account real operating conditions], *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov, Vol. 328, 6. 38–51* [in Russian];
4. Voroncov, A., Zaika, P. (2016). *Osobennosti postroeniya imitatorov bortovyh sistem elektrosnabzheniya* [Features of building simulators of on-board power supply systems], *Silovaya elektronika, 3, 90-93* [in Russian];
5. Starostin, S.S. (2016). *Vyprobuvannya system elektropryvoda z imitaciyeyu texnologichnogo navantazhennya* [Testing of electric drive systems with simulation of technological load], *Elektromexanichni i energozberigayuchi systemy, 4, 38-43* [in Ukrainian];
6. Shkuratov, A.V., Petrovskij, A.V. (2018). *Formirovatel analogovyh volt-ampernykh harakteristik dlya imitatora solnechnoj batarei* [A generator of analog current-voltage characteristics for a solar battery simulator], *Doklady TUSUR, Vol. 21, 3. 93-97* [in Russian];
7. Zhongfu Zhou, Macaulay John (2017). An Emulated PV Source Based on an Unilluminated Solar Panel and DC Power Supply. *Energies*, Vol. 10, Issue 12, 2075 – 2095 [in English];
8. Vergura S. (2016). A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of PV Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation. *Energies*, No. 9, 326 – 338 [in English].
9. E4362A Solar Array Simulator DC Module, 130V, 5A, 600W. URL: <https://www.keysight.com/en/pd-370040-pn-E4362A/solar-array-simulator>

dc-module-130v-5a-600w?cc=UA&lc=eng.
10. Photovoltaic geographical information system.
URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA.

11. Multicrystalline modules LDK-245-20.
Professional series. URL: www.ldksolar.com.

array-simulator-dc-odule-130v-5a-600w?cc=UA&lc=eng.
10. Photovoltaic geographical information system.
URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA.

11. Multicrystalline modules LDK-245-20.
Professional series. URL: www.ldksolar.com.

SHAVELKIN ALEXANDER

shavolkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3914-0812>

ResearcherID: T-2652-2018

Kyiv National University of Technologies & Design

KRUHLIAK HENNADI

gvk1907@gmail.com

Kyiv National University of Technologies & Design

SHVEDCHUKOVA IRYNA

ishved89@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>

ResearcherID: O-2765-2018

Kyiv National University of Technologies & Design

MARCHENKO RUSLAN

r.marchencko@ukr.net

Kyiv National University of Technologies & Design

PISOTSKII ANDRII

a.pesotskii@gmail.com

Kyiv National University of Technologies & Design

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

ШАВЁЛКИН А.А., ШВЕДЧИКОВА И.А., КРУГЛЯК Г.В.,
МАРЧЕНКО Р.Н., ПЕСОЦКИЙ А.В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработка экспериментальной установки для испытаний программно-аппаратных средств управления фотоэлектрической системой подключенного к сети локального объекта, что наряду с проверкой работоспособности позволит осуществить анализ работы и корректировку настройки систем с различными параметрами при различных погодных условиях, графиках нагрузки и режимах работы.

Методика. Экспериментальные исследования с предварительным обоснованием настроек по данным расчетов и имитационного моделирования в программе Matlab.

Результаты. Разработана структура и изготовлена экспериментальная установка на базе фотоэлектрической системы с аккумуляторным накопителем и использованием эмулятора фотоэлектрической батареи с программным управлением генерацией и мощностью нагрузки. Разработаны программные модули системы. По результатам имитационного моделирования определены моменты времени, когда в экспериментальной установке осуществляется переключение режима работы. Проведено испытание экспериментальной установки в статическом и динамическом режимах. Статические испытания были направлены на проверку функционирования эмулятора фотоэлектрической батареи согласно заданным мощности солнечного излучения и температуры фотомодуля, а также на проверку корректности используемой в программе модели. Испытания в статике при фиксированных параметрах и в динамике в суточном цикле, в целом, подтвердили работоспособность предложенных решений.

Научная новизна. Получил развитие метод экспериментальных исследований в суточном цикле средств управления фотоэлектрическими системами с использованием программно-управляемых эмуляторов фотоэлектрической батареи и нагрузки с масштабированием по мощности. Это наряду с ускорением эксперимента позволяет оценивать эффективность

испытываемых систем при различных соотношениях параметров систем и корректировать алгоритмы функционирования.

Практическая значимость. Предложенные решения по реализации экспериментальной установки позволяют минимизировать материальные затраты и затраты времени в процессе испытаний и разработки программно-аппаратных средств управления фотоэлектрической системой с аккумуляторными накопителями.

Ключевые слова: программно-аппаратное средство, экспериментальная установка, подключенная к сети фотоэлектрическая система, аккумулятор, эмулятор фотоэлектрической батареи с программным управлением, испытания, многозонная тарификация, суточный цикл.

DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR TESTING OF SOFTWARE-HARDWARE TOOLS OF MANAGEMENT OF MICRO ENERGY GRIDS OF LOCAL OBJECTS

SHAVELKIN O.O., SHVEDCHYKOVA I.O., KRUHLYAK H.V.,
MARCHENKO R.N., PESOTSKII A.V.

Kyiv National University of Technologies and Design

Goal. Development of the experimental installation for testing of the software and hardware tools of management of a photovoltaic system of a local facility connected to the grid, which, along with checking its operability, will allow analyzing the operation and adjusting the settings of systems with different parameters under different weather conditions, load schedules and operating modes.

Method. Experimental research with preliminary justification of settings based on calculations and simulation data obtained in the Matlab software package.

Results. The structure and experimental installation on the base of the photovoltaic system with storage battery and using a photovoltaic battery emulator with software control of generation and load power were developed. The software modules of the system have been developed. According to the results of the simulation, the moments of time are determined when the operating mode is switched in the experimental setup. The experimental setup was tested in static and dynamic modes. Static tests were aimed at checking the functioning of the photovoltaic battery emulator in accordance with the specified solar radiation power and the temperature of the photo module, as well as checking the correctness of the model used in the program. Tests in statics with fixed parameters and in dynamics in the daily cycle, in general, confirmed the efficiency of the proposed solutions.

Scientific novelty. The method of experimental research in the daily cycle of photovoltaic systems control with the use of software-controlled emulators of a photovoltaic battery and load with power and time scaling was developed. This, along with the acceleration of the experiment, allows us to estimate the effectiveness of the tested systems at different ratios of system parameters and adjust the functioning algorithms.

Practical importance. The proposed solutions for the implementation of the experimental installation allow minimizing material costs and time costs in the process of testing and development of software and hardware control tools of a photovoltaic system with storage battery.

Keywords: software and hardware, experimental installation, grid-connected photovoltaic system, storage battery, software-controlled photovoltaic battery emulator, testing, multi-zone billing, daily cycle.

УДК 620.9

ДЕШКО В.І., БІЛОУС І.Ю., ВИНОРАДОВ-САЛТИКОВ В.О.,
СУХОДУБ І.О., ЯЦЕНКО О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ТА ПОВІТРООБМІНУ В ЗАКЛАДАХ ОСВІТИ ТА ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

Мета. Застосувати інтеграцію підходів до визначення кратності повітрообміну на основі концентрації CO_2 в освітніх закладах та житлових будівлях України.

Методика. Розглядаються експериментально-розрахункове визначення кратності повітрообміну з врахуванням мінливості експлуатаційно-поведінкових особливостей відвідувачів/мешканців будівель. Застосовуються загальнонаукові методи аналізу та синтезу, а також експериментальні методи.

Результати. Рекомендації по забезпеченню умов комфорту з точки зору якості повітря в приміщеннях розглянутих об'єктів, надання рекомендацій, щодо умов експлуатації приміщень, графік провітрювання.

Наукова новизна. Розвинуто комплексний підхід до поглибленого аналізу енергоспоживання, удосконалено процедури оцінювання якості повітря та рівня повітрообміну в будівлях з урахуванням мінливості умов експлуатації.

Практична значимість. Проведено експериментальні дослідження зміни концентрації CO_2 в трьох школах, вищому навчальному закладі та житловій будівлі. Результати проведених досліджень дозволяють встановити фактичний рівень концентрації CO_2 та кратності повітрообміну при різних умовах експлуатації та визначити динаміку зміни досліджуваного фактору в часі під впливом експлуатаційних та поведінкових характеристик будівель в робочі години, при дотриманні комфортних умов, та в години невикористання приміщень. Отримані результати дозволяють надати рекомендації, щодо забезпечення якості повітрообміну в приміщеннях та забезпечення комфортних умов праці/навчання та проживання. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну для приміщень різного призначення дозволить уникнути при математичному моделюванні завищення рівня енергоспоживання будівель, яке виникає при використанні нормативних значень кратності, а також більш точно наблизити результати моделювання рівня енергетичної ефективності будівель до реальних умов, та підібрати оптимальні графіки керування інженерними мережами будівель для забезпечення умов комфорту з врахуванням переривчастих режимів експлуатації будівель.

Ключові слова. заклади освіти, повітрообмін, рівень CO_2 , умови комфорту, якість повітря.

Вступ. Ефективне використання енергетичних ресурсів займає одне з основних місць сталого розвитку країни. З огляду на підвищення рівня життя, урбанізацію, частка споживання енергії будівлями зростає. Цей спектр проблем стосується громадського та житлового фонду будівель. Беручи до уваги зношення будівельного фонду житлових та громадських будівель та недофінансованість закладів освіти, питання ефективного використання енергетичних ресурсів займає важливе місце в суспільстві [1]. Забезпечення ефективного використання енергії без втрати комфорту є основними напрямками сьогодення [2, 3]. Експлуатація та технічне обслуговування будівлі, діяльність та поведінка мешканців, якість навколишнього середовища можуть мати значний вплив [4]. Зменшення споживання енергії та забезпечення комфортних умов [3, 5] є важливими синергетичними ефектами при впровадженні енергозберігаючих заходів.

Останнім часом велика увага приділяється вентиляційній складовій тепловтрат будівлі, яка може становити 30-50% загального споживання енергії [6, 7]. Для забезпечення належних умов праці з точки зору вентиляції в стандарті EN 12831: 2003 [8] регламентується нормативні значення кратності повітрообміну повітря. В системах вентиляції будівель швидкість повітрообміну забезпечується двома шляхами: природним і механічним. У більшості існуючих/старих будівель України не передбачене або не працює механічна вентиляція. Таким чином, через зношеність будівельного фонду вентиляція приміщень здійснюється шляхом надходження свіжого повітря через повітряні канали вентиляційної системи, провітрювання та нецільності у вікна, дверях тощо [5].

Особливості впровадження енергозберігаючих заходів в Україні є поліпшення теплофізичних властивостей огорожувальних конструкцій будівлі, що в свою чергу призводить до суттєвого збільшення концентрації CO₂ у приміщеннях з природною вентиляцією [9]. Зменшення цього компонента є другим кроком у впровадженні енергозберігаючих заходів в Україні. Тому в контексті широкого впровадження програм, спрямованих на підвищення теплозахисних властивостей огорожувальної конструкції будівлі, більшу увагу слід приділяти факторам, що впливають на природну вентиляцію. На повітрообмін впливає велика кількість параметрів, які умовно можна розділити на внутрішні та зовнішні (рис.1).

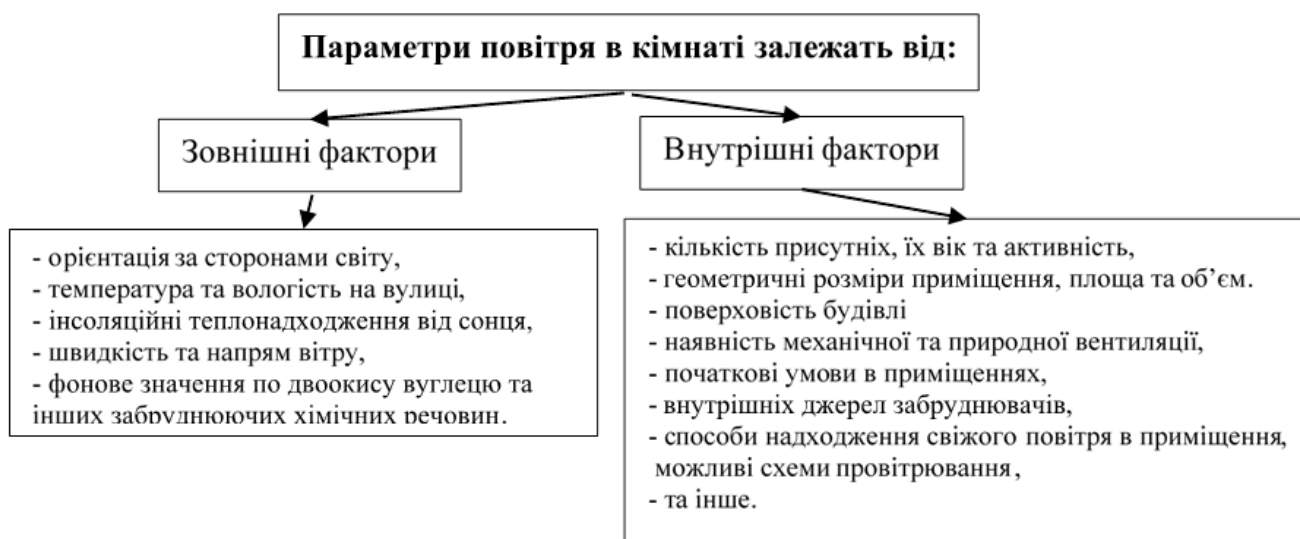


Рис.1 Параметри, що впливають на якість повітря в приміщенні

Інтенсивне використання навчальних будівель призводить до значного збільшення концентрації CO₂ у приміщенні, що потребує додаткового вивчення. В житлових будівлях зростання концентрації CO₂ пов'язано з покращеними характеристиками повітропроникності огорожень та рідким провітрюванням приміщень шляхом відкриття вікон та дверей.

Метою дослідження є застосування інтеграцію підходів до визначення кратності повітрообміну на основі концентрації CO₂ в освітніх закладах та житлових будівлях України.

Постановка завдання. Завдання дослідження полягає у:

- 1) проведенні натурних експериментів в будівлях житлово-комунальної сфери;

- 2) створення математичної моделі приміщень для обробки експериментальних даних;
- 3) дослідженні використання даних про концентрацію CO₂ для визначення швидкості обміну повітря.

Методи дослідження. Існують різні методи вимірювання швидкості обміну повітря, наприклад тести на SF₆ [10], але зазвичай вони досить складні та дорогі. На основі польового експерименту з метою визначення природного повітрообміну для будівель у Південному Китаї та Європі було проведено ряд досліджень [11, 12]; дослідження вимагають спеціального обладнання та забезпечують середнє уявлення про повітрообмін з урахуванням мінливості внутрішніх та зовнішніх параметрів, що впливають на повітрообмін з часом. Зручний метод моніторингу швидкості обміну повітря за допомогою безперервних датчиків CO₂ був розроблений як в лабораторних експериментах, так і на польових дослідженнях у класах в Китаї [13]. Подібні підходи використовувались у статтях [14, 15].

У статті [9] зазначається, що житлові будинки в Центральній та Східній Європі не відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності. Крім того, якості повітря в приміщеннях не приділяється належна увага. Автори [9] провели дослідження концентрації CO₂ у житловому будинку в Словаччині до та після реконструкції. Було встановлено, що після реконструкції повітрообмін значно зменшується, а рівень CO₂ в приміщенні підвищується, тобто реалізація заходів щодо поліпшення теплозахисних властивостей огорожувальної конструкції будівлі повинна йти разом із заходами по належному забезпеченню якості повітря в приміщеннях (механічною вентиляцією).

Для шкіл в Центральній Іспанії з природним повітрообміном [16], що відбувається через відкривання вікон, було проведено дослідження щодо концентрації CO₂ у класах на період опалення та кондиціонування, що містить рекомендації щодо провітрювання класів, які можуть варіюються від 5 до 20 хвилин, залежно від ряду внутрішніх та зовнішніх факторів. Подібні проблеми з високим рівнем CO₂ характерні для шкіл в Україні.

Імітаційне моделювання на основі фізичних та емпіричних методів розрахунку широко використовується для аналізу природного повітрообміну. Фізичні моделі для визначення природного повітрообміну досить складні і вимагають великої кількості вихідних параметрів, що значно ускладнює розрахунки для будівель з багатьма зонами. У цих підходах використовуються алгебраїчні рівняння, що співвідносять особливості будівлі, такі як висота, орієнтація, повітропроникність огороження будівлі та погодні умови. Один з перших підходів був розроблений Шоу та Тамурою [17], який базувався на єдиному рівнянні, яке поєднувало ефект стека та вітру для розрахунку природного обміну повітря.

З огляду підходів впливає, що вивчення якості повітря в приміщенні та параметрів повітрообміну вимагає значної уваги як у низькоефективних будівлях, так і в ефективних будівлях.

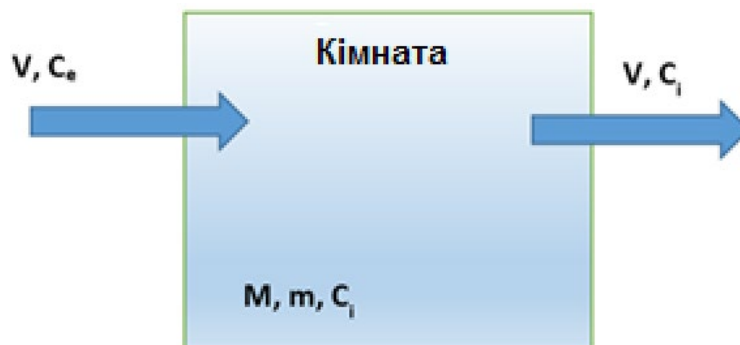
Об'єкти дослідження. Дослідження проводились послідовно та набули розвитку в трьох школах, ВНЗ та житловому будинку. Всі школи типові, побудовані за в роки масової забудови, Н-типу. На основі школи 1 проводилось обґрунтування визначення репрезентативних приміщень, досліджувалось локальне місце встановлення датчиків в приміщеннях для визначення концентрації CO₂ та інших вхідних параметрів для розрахунку природної кратності повітрообміну. В школі 2 було проведено виміри концентрації CO₂ в

репрезентативних приміщеннях на початку та в кінці занять. В школі 3 було проведено виміри концентрації CO₂ для двох варіантів: 1) заміри концентрації CO₂ в репрезентативних приміщеннях на початку та в кінці занять; 2) фіксування динаміки зміни концентрації CO₂ в репрезентативних приміщеннях з 10 хв. кроком з врахуванням зміни кількості студентів, фізичної активності та графіку зайнятості аудиторії. В навчальному корпусі КПП ім. Ігоря Сікорського проводились експериментальні визначення зміни концентрації в репрезентативних приміщеннях в часі. Для житлової будівлі проводилось дослідження для двох варіантів: 1) без провітрювання; 2) з провітрюванням (відкрите вікно на мікропровітрювання). Крім цього, проводилось локальне дослідження фонові зовнішньої концентрації CO₂ біля розглянутих об'єктів впродовж доби з різною віддаленістю від них.

Вимірюється: зовнішня та внутрішня температура та відносна вологість повітря; швидкість та напрямок вітру на вулиці; концентрація CO₂ на вулиці/фонова; графік перебування людей та їх кількість у приміщенні; вид фізичної активності людей.

Для дослідження використовувався комплексний прилад регістратор CO₂ TR-75U1 з діапазоном вимірювань CO₂: 0...9999 ppm, температури: 0...55°C, відносної вологості: 10...95%.

Методика аналізу взаємозв'язку даних по концентрації CO₂ з повітрообміном, а також обробки експериментальних даних. На основі балансів повітряних потоків та концентрацій CO₂ в приміщенні (рис. 2) були отримані наступні співвідношення (1-5).



V_r – об'єм кімнати, м³; V – повітрообмін, м³/год; m – виділення CO₂ в приміщенні, г/год;
 M – маса CO₂ в приміщенні, г; M_0 – початкова маса CO₂ в приміщенні, г;
 C_e, C_i, C_{i0} – концентрація CO₂ в припливному повітрі, у кімнаті в заданий момент часу та початкова відповідно, г/м³

Рис. 2. Схема зміни концентрацій CO₂ в приміщеннях

Концентрація CO₂ в приміщенні визначається:

$$C_i = \frac{M}{V_r}, \quad (1)$$

Зміна кількості CO₂ у часі:

$$\frac{dM}{d\tau} = m + V \cdot C_e - \frac{V}{V_r} M, \quad (2)$$

Кількість CO₂ через інтервал часу $\Delta\tau_j$:

$$M_j = M_{j-1} + \overline{m}_j \Delta \tau_j + \overline{V}_j \cdot \overline{C}_{e,j} \Delta \tau_j - \frac{\overline{V}_j}{V_r} \cdot \frac{M_{j-1} + M_j}{2} \Delta \tau_j, \quad (3)$$

Інтегрування рівняння (2) при сталих значеннях C_e , V and m дає вираз для маси CO_2 в внутрішньому повітрі в будь-який момент часу τ :

$$M = \frac{V_r}{V} \left\{ m + V \cdot C_e + \left[\frac{V}{V_r} \cdot M_0 - (m + V \cdot C_e) \right] \cdot e^{-\frac{V}{V_r} \tau} \right\}, \quad (4)$$

З формули (4) слідує, що внутрішня концентрація CO_2 при сталих значеннях C_e , V і m визначається:

$$C_i = \frac{m}{V} + C_e + \left[C_{i0} - \left(\frac{m}{V} + C_e \right) \right] \cdot e^{-\frac{V}{V_r} \tau}, \quad (5)$$

Експериментальні дані зміни концентрації CO_2 в приміщенні в часі оброблялися рівнянням (5).

Результати дослідження. Експериментальне визначення фонові концентрації CO_2 впродовж доби локально біля розглянутих об'єктів показало, що фонові концентрації CO_2 знаходяться в діапазоні 400-420 ppm. На прикладі школи 1 проводилось експериментальне дослідження визначення локальних вимірів концентрації CO_2 в приміщеннях в період та після закінчення занять. Були проведені вимірювання розподілу концентрації CO_2 після занять по площі класу, за яким розбіжність між значеннями на рівні парт складала 30...180 ppm. Дослідження показали, що прийнятним є використання інтегральної характеристики концентрації CO_2 в репрезентативному приміщенні в центрі кімнати на висоті біля одного метру (область робочої зони).

Виміри внутрішньої концентрації CO_2 в школі 2 в період канікул були досить близькими до фонові концентрації, виключенням стали класи, де працювали гуртки. Період навчання проводились контрольні заміри концентрації CO_2 в приміщеннях на початку занять, після занять та після перерви.

Встановлено концентрація CO_2 змінюється впродовж заняття на 700-1100 ppm та суттєво перевищує норму. За перерву концентрація CO_2 знижується на 500-1000 ppm, залежно від виду провітрювання. В школі 3 проводились 10 хв. виміри концентрації CO_2 в репрезентативних класах. На рис. 3 наведено визначення кратності повітрообміну на прикладі старших класів протягом трьох занять та двох перерв.

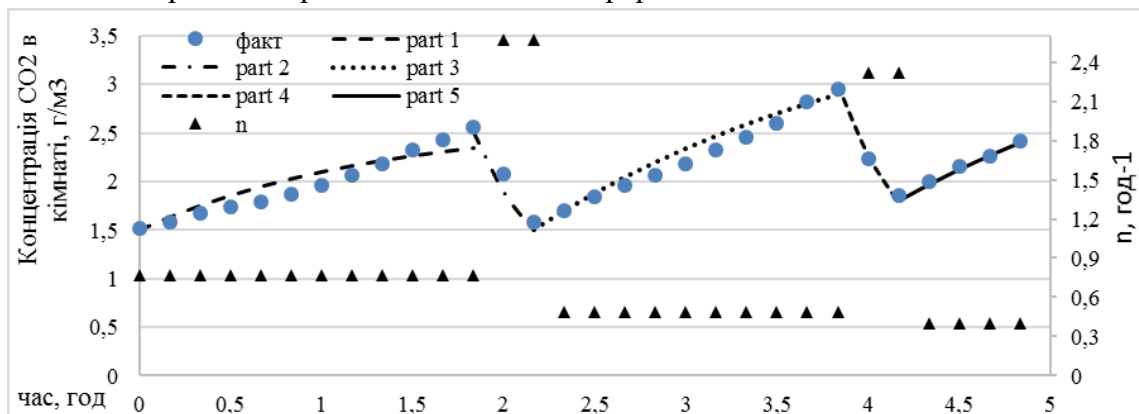


Рис. 3 Зміна внутрішньої концентрації CO_2 та кратності повітрообміну в навчальному класі школи 3

Кратність повітрообміну в період занять (part 1,3,5) знаходиться в діапазоні $0,5 \dots 0,75 \text{ год}^{-1}$ (закриті вікна та двері). На перервах учні залишають приміщення та відбувається провітрювання класів через відкриття вікон та дверей, в цей період (part 2,4) кратність повітрообміну збільшується до $2,9-3,5 \text{ год}^{-1}$. Для розглянутого діапазону середньозважена кратність повітрообміну становить $0,93 \text{ год}^{-1}$ та навіть при примусовому провітрюванні класів є недостатньою з точки зору забезпечення належного рівня повітрообміну та допустимої концентрації CO_2 .

Аналогічні дослідження зміни концентрації CO_2 проводилось для навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Будівля протяжна 7 поверхова з технічним поверхом, основна частина навчальних аудиторій та лабораторій має одне зовнішнє огороження орієнтоване на Пд чи Пн. В корпусі провітрювання навчальних аудиторій здійснюється шляхом відкриття дверей на коридори, механічна вентиляція не працює. Дослідження проводились з кроком 15 хв. На прикладі обробки експериментальних даних по зміні концентрації CO_2 в навчальних аудиторіях проведено розрахунок природної кратності повітрообміну (рис. 4).

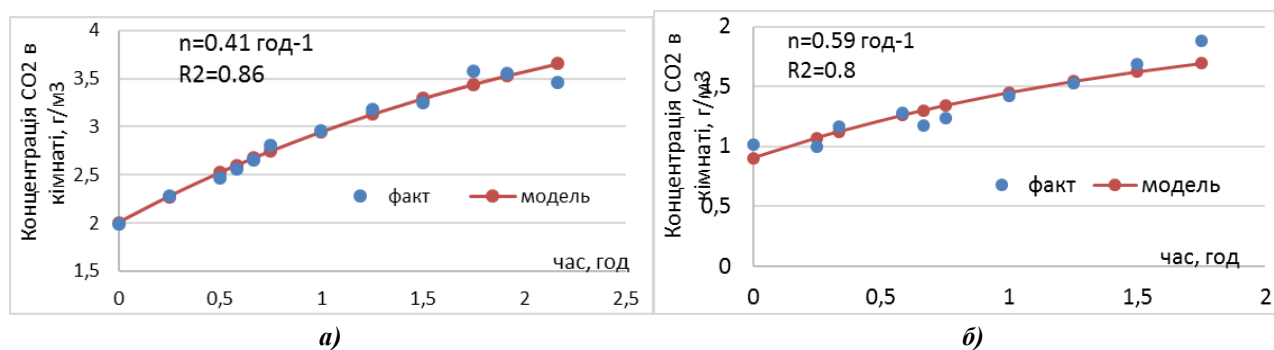


Рис. 4. Повітрообмін для приміщень розташованих на 3 поверсі (а) і 1 поверсі (б) південної орієнтації

Зменшення кратності повітрообміну на 3 поверсі пояснюється зменшенням стак ефекту, відповідно до складових механізму повітрообміну.

Аналогічні дослідження проводились для великих лекційних аудиторій, де вплив провітрювання під час перерви виявився більш вираженим. З аналізу слідує, що значення середнього повітрообміну в таких аудиторіях становить $0,48 \text{ год}^{-1}$ (оброблення графіку середнім значеннями V), при окремій обробці частових інтервалів з провітрюванням та встановлено, що кратність повітрообміну в періоди закритих дверей становить $0,4-0,6 \text{ год}^{-1}$, при відкритих дверях може сягати $0,95 \text{ год}^{-1}$. Середньозважена кратність повітрообміну для розглянутого проміжку часу при кусковому аналізі становить 0.43 год^{-1} , на відміну від 0.48 год^{-1} для усередненого рівняння.

Житлова будівля суттєво відрізняється за експлуатаційними показниками від закладів освіти, що були розглянуті вище. Дослідження проводились в 2-кімнатній квартирі, яка відповідає сучасним тепло-фізичним вимогам, яка розташована на 4 поверсі 5-поверхової будівлі. Виміри концентрації CO_2 фіксувалися з кроком 1 хв. Проводились наступні натурні експерименти замірів концентрації CO_2 в кімнатах та кухні: 1) з та без додаткових внутрішніх виділень CO_2 ; 2) з та без мікропровітрювання в кімнатах. Будівля відповідає теплоізоляційним сучасним вимогам, а отже для такого типу будівель вентиляційна складова є найбільшою в загальному енергобалансі втрат будівлі.

Враховуючи, що виділення CO₂ в житлових приміщеннях нижчі ніж в освітніх закладах. Попередньо перед проведенням експерименту штучно збільшувалася концентрація CO₂ шляхом спалювання таблеток сухого спирту в досліджуваних приміщеннях. Це дозволить більш якісно відстежувати динаміку зміни концентрації CO₂ в приміщеннях.

На початку дослідження при закритому вікні і дверях в кімнаті 1 концентрація CO₂ знаходиться на рівні 2000 ppm, після години з відкритими дверима на коридор концентрація CO₂ зменшилася 1700 ppm, тобто на 300 ppm. При закритих дверях та вікні в кімнаті 1 аналогічна зміна концентрації CO₂ на 300 ppm відбувається за 3 год. Якщо вікно відкрите на мікропровітрювання та зачинені двері за 2 години концентрація CO₂ в кімнаті 1 змінюється від 3000 ppm до 580 ppm.

В кімнаті 2 при закритих вікнах та дверях за відсутності людей концентрація CO₂ змінюється від 1950 ppm до 1250 ppm за 6 годин. За умови відкритого вікна на мікропровітрювання та відкритих внутрішніх міжкімнатних дверях за 2 год. концентрація CO₂ зменшується від 2850 ppm до 1050 ppm, тобто на 1800 ppm. Концентрація CO₂ в кімнаті 2 повільніше зменшується порівняно з кімнатою 1, що пояснюється тим, що вікно з кімнати 2 відкривається на застелений балкон на відміну від кімнати 1. Потрібно відмітити, що високі концентрації CO₂ в приміщенні створені штучно для дослідження динаміки зміни CO₂ різними механізмами провітрювання.

На кухні встановлена витяжка потужності 200 м³/год. Проведено вимірювання концентрації CO₂ з та без працюючої витяжки. Під час приготування їжі на газовій плиті протягом 30 хв. концентрація CO₂ збільшується від 1500 ppm до 2200 ppm, тобто на 700 ppm без працюючої витяжки та зачиненому вікні. За умови інтервальної роботи витяжки в період приготування їжі концентрація CO₂ мала зростаючу і спадаючу тенденцію та знаходилася в діапазоні 2200...1300 ppm. Спочатку спостерігається зменшення на 910 ppm за 1 год, далі зростання на 300 ppm за 15 хв. (вимкнена витяжка), подальші 30 хв. концентрація CO₂ зменшується на 200 ppm.

Використовуючи формулу (5) було оброблено експериментальні дані, що дозволили визначити фактичну кратність повітрообміну. Кратність повітрообміну при закритих вікнах та дверях становить кімнаті 1 – 0,14 год⁻¹, в кімнаті 2 – 0,1 год⁻¹, в кухні – 0,3 год⁻¹ (рис. 5). З проведеного аналізу балансів повітрообміну в квартирі слідує, що для житлових кімнат характерним є інфільтрація повітря, а на кухні – ексфільтрація.

За умови мікропровітрювання в кімнатах створюється наступна кратність повітрообміну в: кімнаті 1 – 1,4 год⁻¹, кімнаті 2 – 0,73 год⁻¹ (вікна виходять на застелений балкон) (рис. 6), кухня – 1,4...1,5 год⁻¹ (працює витяжка) (рис. 7).

На рис. 5 наведено зміну концентрації CO₂ в житлових приміщеннях (в кімнаті 1 рис. 2,а, в кімнаті 2 - рис. 2.,б) без провітрювання та відсутності людей.

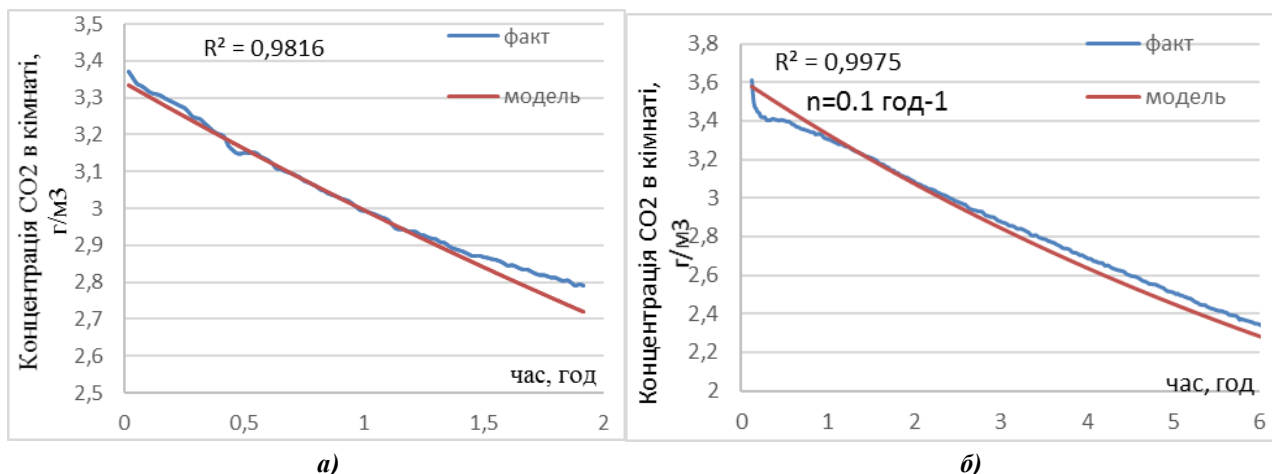


Рис. 5. Повітрообмін в кімнаті 1 (а) та кімнаті 2 (б) без провітрювання

На рис. 6 наведено зміну концентрації CO_2 в житлових приміщеннях (кімната 1 - рис. 3,а, кімната 2 - рис. 3,б) з мікропровітрюванням. На відміну від рис. 5 на рис. 6 спостерігається більша кривизна, що пояснюється збільшенням кількості свіжого повітря, яке надходить кімнати.

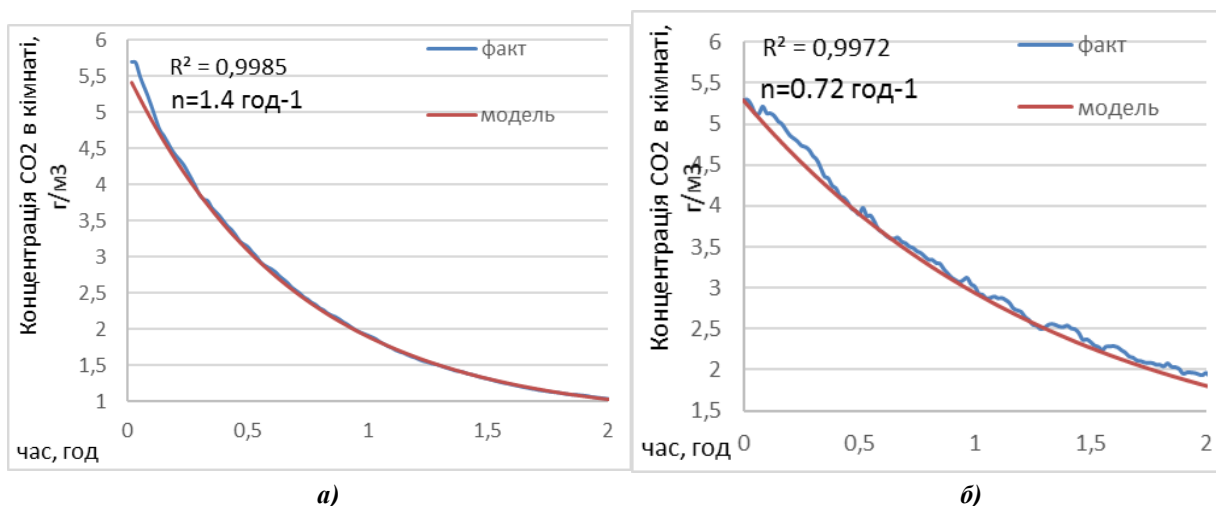


Рис. 6. Повітрообмін в кімнаті 1 (а) і кімнаті 2 (б) з мікропровітрюванням

На рис. 7 наведено зміну концентрації CO_2 в часі для переривчастих режимів роботи витяжки. З рис. 7 видно, що в період відсутності роботи витяжки та закритому вікні кратність повітрообміну становить $0,15 \text{ год}^{-1}$.

Експериментальні дослідження показують, що в розглянутій квартирі за умови відсутності штучного провітрювання або механічної вентиляції кратність повітрообміну знаходиться на рівні $0,1 \dots 0,155 \text{ год}^{-1}$, що пояснюється високим опором повітропроникності огорожувальних конструкцій. Отримані результати досліджень відповідають аналогічним результатам інших досліджень [5]. Потрібно відмітити, що нормативне значення рівня концентрації CO_2 для житлових та громадських будівель знаходиться в діапазоні $750 \dots 1000 \text{ ppm}$, кратність повітрообміну: в житлових будівлях – $0,8 \text{ год}^{-1}$, школи, ВНЗ – 1 год^{-1} .

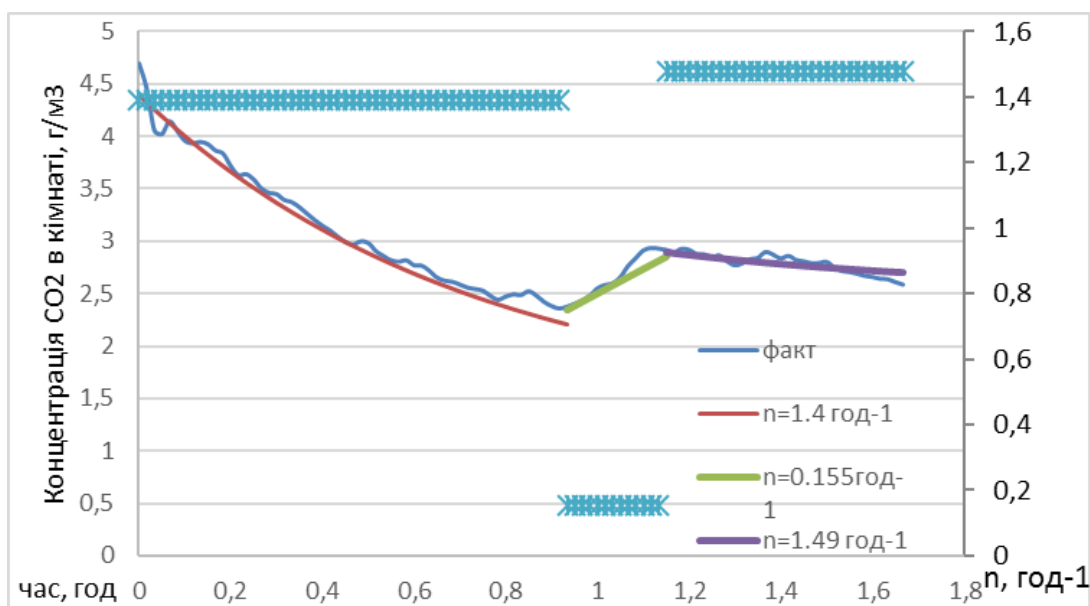


Рис. 7. Зміна концентрації CO₂ на кухні для різних експлуатаційних режимів витяжної системи

Висновки. Для чотирьох закладів освіти (3 школи та навчальний корпус КПІ ім. Ігоря Сікорського) та житлових будинків проведено дослідження зміни концентрації CO₂ для різних часових інтервалів, графіків експлуатації, тощо. В роботі показано, що виміри концентрації CO₂ важливі не тільки для контролю забезпечення та регулювання умов комфортності, але й можуть слугувати для визначення фактичних значень кратності повітрообміну в окремих приміщеннях.

I. На прикладі дослідження трьох шкіл міста Києва встановлено, що:

- 1) Експериментальне дослідження локальної фонові концентрації CO₂ біля досліджуваних будівель є майже постійним в часі та становить біля 450 ppm.
- 2) Концентрація CO₂ в класах протягом занять зростає майже в 2 рази та перевищує норму на 700-1100 ppm. В період канікул концентрація CO₂ в класах близька до фонові.
- 3) Експеримент показав, що концентрація CO₂ в приміщеннях суттєво збільшується в період проведення занять, тому необхідне провітрювання, але наявний рівень його не завжди є достатнім. Кратність повітрообміну в період занять знаходиться в діапазоні 0,5...0,75 год⁻¹ (закриті вікна та двері), під час провітрювання класів через відкриття вікон та дверей кратність повітрообміну збільшується до 2,9-3,5 год⁻¹, середньозважена кратність повітрообміну становить 0,93 год⁻¹ та навіть при примусовому провітрюванні класів є недостатньою з точки зору забезпечення належного рівня повітрообміну та допустимої концентрації CO₂.

II. Аналогічні дослідження проведені для навчального корпусу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Встановлено на основі експериментальних даних, кратність повітрообміну для навчального корпусу ВНЗ знаходиться в діапазоні 0,35 – 0,7 год⁻¹ залежно від розташування аудиторій. В періоди провітрювання (відкриття дверей на коридор) повітрообмін може збільшуватися на 0,45 год⁻¹, але це не дозволяє досягти нормативного значення.

III. Дослідження проведені у житловій будівлі показують, що за умов відсутності штучного провітрювання або механічної вентиляції кратність повітрообміну знаходиться на рівні 0,1...0,155 год⁻¹, що пояснюється високим опором повітропроникності огорожувальних

конструкцій. За умови мікропровітрювання в кімнатах створюється кратність повітрообміну на рівні $0,73 \dots 1,4 \text{ год}^{-1}$.

IV. Зазвичай, для розрахунку рівня енергетичної ефективності будівель використовують нормативне значення кратності повітрообміну, що суттєво завищує рівень енергоспоживання будівлі. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну дозволить більш точно наблизити результати математичного моделювання енергетичних характеристик будівель до реальних умов та підібрати оптимальний графік управління інженерними мережами будівлі, в тому числі підібрати оптимальні переривчасті режими опалення з забезпечення комфортних умов в робочі години.

Література

1. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Аналіз енергетичних і математичних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергетичних заходів. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*. 2014. Вип. №1(5). С. 108-115.
2. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буюк Н.А. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Вісник КНУТД*. 2015. Вип. №5(90). С 71-80.
3. Deshko V., Buyak N., Bilous I., Voloshchuk V. Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the "heat source - human - building envelope". *Energy*. 2020. Vol. 200.
4. Yoshino H., Hongb T., Nord N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. Pp. 124–136.
5. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 6(4). Pp. 27–41.
6. Younes, C., Shdid, C., Bitsuamlak, G. Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*. 2012. Vol. 35 (3). Vol. 267–302.
7. Jokisalo, J., Kalamees, T., Kurnitski, J., Eskola, L., Jokiranta, K., Vinha, J. A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. *Journal of Building Physics*. 2008. Vol. 32 (1). Pp. 67–89.
8. EN 12831: 2003 Heating of systems in buildings - Method of for calculation of the design heat load. (The heating systems in building are Calculation of the thermal loading). CEN, 2003. P. 76.

References

1. Shovkaliuk M.M, Bilous I.Y. (2014) Analiz enerhetychnykh i matematychnykh pokaznykiv i balansiv navchalnoho zakladu z rozrobkoiu enerhetychnykh zakhodiv [The analysis of energy and material balances performance and the school with the development of energy saving measures]. *Ekolohichni nauky*, 1(5), 108-115 [in Ukrainian].
2. Deshko V.I., Bilous I.Y., Buyak N.A. (2015) Vybir teplovoho zakhystu ta dzherela tepla iz vrakhuvanniam komfortnykh umov u budivli [Comprehensive choice of building envelope and the heat sources, taking into account the comfort conditions in buildings]. *Visnyk KNTUTD*, 5(90), 71-80 [in Ukrainian].
3. Deshko V., Buyak N., Bilous I., Voloshchuk V. Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the "heat source - human - building envelope". *Energy*, Vol. 200, 2020.
4. Yoshino H., Hongb T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. Pp. 124–136.
5. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 6(4). Pp. 27–41.
6. Younes, C., Shdid, C., Bitsuamlak, G. Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*. 2012. Vol. 35(3). Vol. 267–302.
7. Jokisalo, J., Kalamees, T., Kurnitski, J., Eskola, L., Jokiranta, K., Vinha, J. A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. *Journal of Building Physics*. 2008. Vol. 32(1). Pp. 67–89.
8. EN 12831:2003 Heating of systems in buildings - Method of for calculation of the design heat load. (The

9. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 363–372.
10. Johnson, T, Myers, J, Kelly, T, Wisbith, A, Ollisonc, W. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2004. Vol. 14(1). Pp. 1–22.
11. Yongming, J., Duanmu, L., Li, X. Building air leakage analysis for individual apartments in North China. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 105-115.
12. Almeida R., Ramos N., Pereira P. A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 139. Pp. 174–185
13. You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu, Y., Bai, Z., Zhang, J., He, F., Zhang, N. Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO₂ sensors. *Journal of Environmental Sciences*. 2012. Vol. 24(4). Pp. 657–664
14. Salthammer, T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. *Building and Environment*. 2019. Vol. 150. Pp. 219–232.
15. Shi, S., Chen, C., Zhao, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. Pp. 528–537.
16. Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., Buonanno, G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 894–902.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 316–323.
- heating systems in building are Calculation of the thermal loading). CEN, 2003. P. 76.
9. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 363–372.
10. Johnson, T, Myers, J, Kelly, T, Wisbith, A, Ollisonc, W. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2004. Vol. 14(1). Pp. 1–22.
11. Yongming, J., Duanmu, L., Li, X. Building air leakage analysis for individual apartments in North China. *Building and Environment*. 2017. Vol. 122. Pp. 105-115.
12. Almeida R., Ramos N., Pereira P. A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 139. Pp. 174–185
13. You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu, Y., Bai, Z., Zhang, J., He, F., Zhang, N. Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO₂ sensors. *Journal of Environmental Sciences*. 2012. Vol. 24(4). Pp. 657–664
14. Salthammer, T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. *Building and Environment*. 2019. Vol. 150. Pp. 219–232.
15. Shi, S., Chen, C., Zhao, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. Pp. 528–537.
16. Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., Buonanno, G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 894–902.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 316–323.

DESHKO VALERII

te@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>

ResearcherID: J-6517-2017

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

BILOUS INNA

bilous_inna@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6640-103x>

ResearcherID: J-7070-2017

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

VOLODYMYR VYNOGRADOV-SALTYKOV
bcbactn@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3612-8386>
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SUKHODUB IRYNA
ira_krot@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>
ResearcherID: I-9788-2017
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
YATSENKO OLENA
loco-motion@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8001-5987>
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА И ВОЗДУХООБМЕНА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ И ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

ДЕШКО В.И., БЕЛОУС И.Ю., ВИНОРАДОВ-САЛТЫКОВ В.А., СУХОДУБ И.О.,
ЯЦЕНКО Е.И.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря
Сикорского»

Цель. Применить интеграцию подходов к определению кратности воздухообмена на основе концентрации CO_2 в образовательных учреждениях и жилых зданиях Украины.

Методика. Рассматривается экспериментально-расчетное определение кратности воздухообмена с учетом динамики эксплуатационно-поведенческих особенностей посетителей / жителей зданий. Применяются общенаучные методы анализа и синтеза, экспериментальные методы.

Результаты. Рекомендации по обеспечению условий комфорта с точки зрения качества воздуха в помещениях рассматриваемых объектов, предоставление рекомендаций относительно условий эксплуатации помещений, график проветривания.

Научная новизна. Развито комплексный подход к углубленному анализу энергопотребления, усовершенствовано процедуры оценки качества воздуха и уровня воздухообмена в зданиях с учетом изменчивости условий эксплуатации.

Практическая значимость. Проведено экспериментальные исследования изменения уровня концентрации CO_2 в трех школах, высшем учебном заведении и жилом здании. Результаты проведенных исследований позволяют установить фактический уровень концентрации CO_2 и кратности воздухообмена при различных условиях эксплуатации и определить динамику изменения исследуемого фактора во времени под влиянием эксплуатационных и поведенческих характеристик зданий в рабочие часы, при соблюдении комфортных условий, и в часы неиспользования помещений. Полученные результаты позволяют дать рекомендации по обеспечению качества воздухообмена в помещениях и обеспечению комфортных условий труда / учебы и проживания.

Использование экспериментально-расчетных значений кратности воздухообмена для помещений различного назначения позволит избежать при математическом моделировании завышения уровня энергопотребления зданий, которое возникает при использовании нормативных значений кратности, а также позволит более точно приблизить результаты математического моделирования уровня энергетической эффективности зданий к реальным условиям и подобрать оптимальный график управления инженерными сетями здания для обеспечения условий комфорта с учетом прерывистых режимов эксплуатации здания.

Ключевые слова. учебные заведения, воздухообмен, уровень CO_2 , условия комфорта, качество воздуха.

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR QUALITY AND AIR EXCHANGE IN EDUCATIONAL AND RESIDENTIAL BUILDINGS

DESHKO V.I., BILOUS I.YU., VYNOGRADOV-SALTYKOV V.O., SUKHODUB I.O.,
YATSENKO O.I.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Purpose. Apply integrated approaches for the air exchange rate determination based on CO₂ concentration in educational and residential buildings of Ukraine.

Methods. Taking into account variability of building's visitors and occupants operational and behavioral features experimental and calculated determination of the air exchange rate are considered.

Results. Recommendations for providing comfort conditions in terms of air quality in the considered objects premises, recommendations on the premises operating conditions, ventilation schedule.

Scientific novelty. The comprehensive approach to in-depth analysis of energy consumption has been developed, procedures for assessing the air quality and the level of air exchange in buildings have been improved taking into account the variability of operating conditions.

The practical significance. Experimental studies of changes in CO₂ concentration were conducted in three schools, in higher education institution and in residential building. The research results allowed to establish the actual level of CO₂ concentration and air change rate under different operational and behavioral conditions in buildings during working hours, subject to comfortable conditions, and during non-use hours. The research results also help to determine the dynamics of changes in the studied factor over time under the building performance indicators influence. The obtained results allow to provide recommendations on ensuring the quality of indoor air exchange and on providing comfort working, studying and living conditions.

The use of experimental and calculated air exchange rate values for various premises would allow to avoid in mathematical modeling the overestimation of the level of buildings energy consumption, which arises when standard air change rate values is using. So the obtained results allow to approximate more accurately the mathematical modeling results of buildings energy efficiency to the actual conditions and help to choose the optimal schedule for the building engineering networks managing considering comfort conditions with intermittent operation.

Keywords: educational institutions, air exchange, CO₂ level, comfort conditions, air quality.

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

МАШИНА ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З СЕМИЛАНКОВИМ ПРОСТОРОВИМ МЕХАНІЗМОМ - СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета. Синтез семиланкового просторового статично визначеного механізму без надлишкового (пасивного) зв'язку з додатковою рухомою ланкою машини для обробки деталей з подальшим аналітичним дослідженням його основних конструктивних та геометричних параметрів.

Методика. Використано аналітичний метод дослідження на основі геометричного та структурного синтезу просторового статично визначеного семиланкового механізму з додатковою рухомою ланкою без надлишкового зв'язку машини для обробки деталей, виконано 3D моделювання машини в системі автоматизованого проектування SolidWorks 2016.

Результати. На основі структурного синтезу запропоновано конструкцію семиланкового просторового статично визначеного механізму з додатковою рухомою ланкою машини для обробки деталей, у кінематичному ланцюзі просторового механізму відсутній надлишковий зв'язок, виконано 3D моделювання машини в системі автоматизованого проектування SolidWorks 2016. Проведено аналітичні дослідження основних геометричних та конструктивних параметрів розробленої машини.

Наукова новизна. Встановлено взаємозв'язок між різними геометричними параметрами просторового статично визначеного семиланкового механізму, що дає можливість розрахувати раціональні співвідношення довжин ланок механізму для забезпечення безперешкодного функціонування машини без заклинювання її просторового механізму.

Практична значимість. Розроблено нову конструкцію машини для обробки деталей, в основі якої використовується семиланковий просторовий статично визначений механізм з додатковою рухомою ланкою без надлишкового зв'язку. Отримані математичні залежності для розрахунку її основних конструктивних та геометричних параметрів. Дані залежності можуть бути використані відповідними машинобудівними підприємствами на стадії проектування такого типу обладнання.

Ключові слова: надлишковий зв'язок, семиланковий просторовий механізм, зворотно-поступальне переміщення, робоча ємкість.

Вступ. Відомі три способи [1] очищення поверхонь деталей та покращення їх якості: з використанням ручної праці або засобів малої механізації, однак такий спосіб є малоефективним, потребує значного часу та робочого потенціалу; із застосуванням універсальних пристроїв (токальні, фрезерувальні, свердлильні та шліфувальні верстати), такий спосіб застосовують при виготовленні деталей, де необхідне зняття точно визначеної величини припуску; при обробці деталей технологічним середовищем в рухомих робочих ємкостях [2]. Таким способом обробляються деталі, для яких відсутні вимоги щодо зняття точно визначеної величини припуску з їх оброблюваної поверхні. Таким методом, наприклад, виконується відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників [3, 4], при використанні холодоагентів, реалізується відділення від ливників відлитих деталей взуття [5], виконуються технологічні процеси шліфування [6] та полірування [7, 8], як металевих, так і полімерних деталей тощо. При цьому використовують сухе та вологе галтування відповідно.

Для реалізації вищезгаданих технологічних операцій використовують різні типи галтувального обладнання. Серед різних типів обладнання, перспективним вважаються машини [9, 10], робочі ємкості яких виконують складний просторовий рух [11]. 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. В результаті чого досягається значне підвищення продуктивності виготовлення деталей з одночасним зменшенням енерговитрат.

Постановка завдання. Відома [12] «базова» конструкція машини зі складним рухом робочої ємкості, яка, зі структурної точки зору, представляє собою шестиланковий просторовий механізм з обертальними кінематичними парами. Такий просторовий механізм має свої особливості – в його структурі наявним є надлишковий (пасивний) зв'язок, який негативно впливає на довговічність та експлуатаційні характеристики механізму. Встановлено [13], що механізм може функціонувати лише при дотриманні співвідношень довжин його ланок з високою точністю. Під час роботи механізму, навіть при незначній деформації однієї з ланок, може виникнути його заклинювання, як наслідок він одразу виходить з ладу. Крім того, деталі потрібно виготовляти за допусками з підвищеною точністю. За рахунок цього, собівартість такого обладнання значно підвищується, а термін експлуатації знижується.

Таким чином, синтез та аналітичне дослідження конструктивних особливостей просторових механізмів галтувальної машини, в кінематичному ланцюзі яких відсутній надлишковий зв'язок, є актуальною задачею на сьогоднішній день, що потребує вирішення.

Результати дослідження. У роботі [14] було розглянуто «базову» конструкцію машини, в якій робоча ємкість виконує складний просторовий рух. Рухомі ланки цієї машини утворюють собою просторовий шестиланковий механізм з обертальними кінематичними парами. Кінематична схема просторового механізму «базової» конструкції механізму машини та її модель створена за допомогою САПР SolidWorks представлено на рис. 1 а та б відповідно.

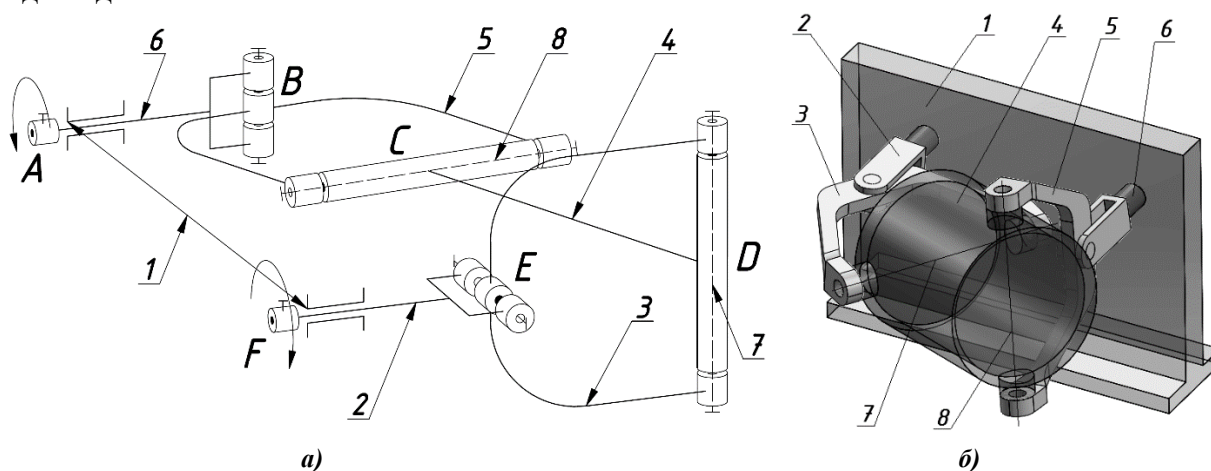


Рис. 1. а – кінематична схема «базової» конструкції механізму, б – модель машини

Машина містить станину 1, ведучий 2 та ведений 6 вали, встановлені в станині паралельно в одній площині та з'єднані між собою подвійним просторовим шарніром, що виконаний у вигляді ведучої вилки 3, веденої вилки 5 та робочої ємкості 4, закріпленої між вилками на діаметрально взаємно перпендикулярних геометричних осях 7 та 8 відповідно. Рухомі ланки машини утворюють собою просторовий шестиланковий механізм з обертальними кінематичними парами, який являє собою замкнений кінематичний ланцюг ABCDEF, вісі А та F паралельні між собою, а вісі А і В, В і С, С і D, D і Е, Е і F перпендикулярні між собою відповідно.

Використовуючи формулу Сомова-Малишева [15] для визначення ступеня рухомості механізму, встановлено, що він буде дорівнювати нулю:

$$W = 6n - \sum_{s=1}^{s=5} (6-s)p_s = 0, \quad (1)$$

де n – кількість рухомих ланок (5 ланок: ведучий 1 та ведений 6 вали, ведуча 3 та ведена 5 вилки, робоча ємкість 4), p_s – кількість рухомих кінематичних пар s – класу (6 кінематичних пар 5-го класу: А, В, С, D, Е, F).

Відомо [1], що звільнитися від дії надлишкового зв'язку можна на основі введення в кінематичний ланцюг механізму додаткової рухомої ланки або на основі заміни однієї з кінематичних пар 5-го класу на кінематичну пару 4-го класу. Таким чином, було синтезовано семиланковий просторовий механізм машини [16], в якому введено додаткову рухому ланку, яка за допомогою обертальної кінематичної пари з'єднана з ведучою вилкою, а також за допомогою поступальної кінематичної пари з'єднана з робочою ємкістю. Таким чином, додаткова рухoma ланка, виконує зворотно-поступальне переміщення в середині робочої ємкості. В результаті чого, в процесі роботи машини, буде циклічно змінюватися її об'єм. На рис. 2а представлено кінематичну схему синтезованого механізму, на рис. 2б – модель розробленої машини, яка створена за допомогою САПР SolidWorks.

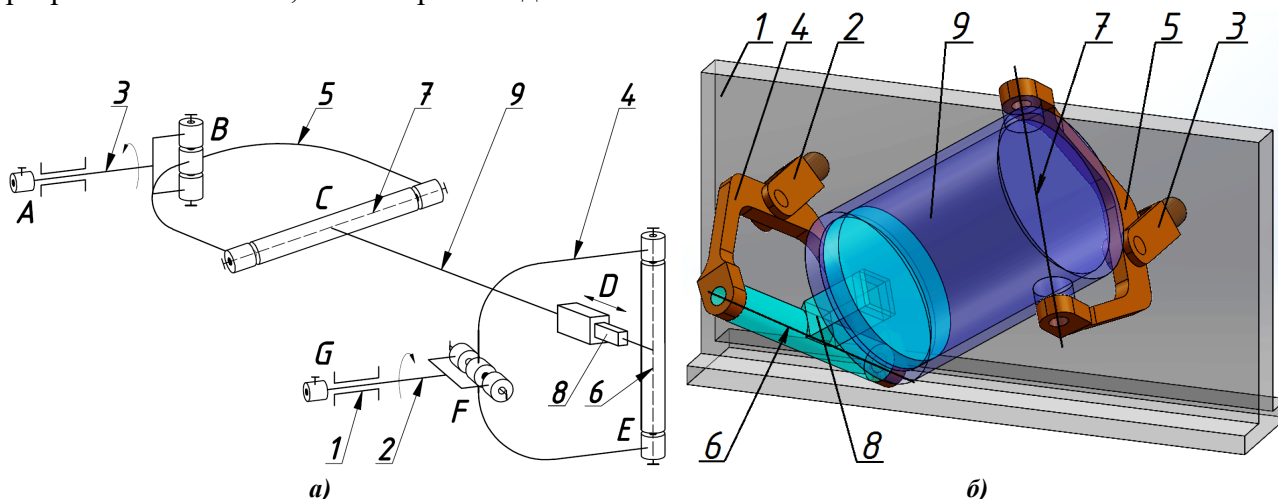


Рис. 2. а – кінематична схема синтезованого механізму, б – модель машини

Машина для обробки деталей містить станину 1, ведучий 2 та ведений 3 вали, що встановлені в підшипникових опорах станині паралельно в одній площині. Ведучий 2 та ведений 3 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучою вилкою 4 та веденою вилкою 5

відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 6 і 7 є вісями кріплення додаткової рухомої ланки 8 та робочої ємкості 9 відповідно. Додаткова рухома ланка 8, що представляє собою поршень, який за допомогою поступальної кінематичної пари D рухомо з'єднаний з робочою ємкістю 9 та за допомогою обертальної кінематичної пари E – з ведучою вилкою.

Аналітичне дослідження даного механізму машини слід починати задаючись вихідними геометричними параметрами, які обираються в залежності від специфіки технологічної операції, яка виконуються на даному обладнанні, зокрема: $l_{PE(MIN)}$ – мінімальна відстань між торцем робочої ємкості та рухомим торцем додаткової рухомої ланки, l_B – міжосьова відстань ведучої та веденої вилки, $l_{BB(MIN)}$ – мінімальна відстань між геометричними вісями кріплення вилки до додаткової рухомої ланки та до робочої ємкості. Функціонування даної машини може забезпечуватися лише при виконанні наступної умови:

$$l_{BB(MIN)} > l_B. \quad (2)$$

При виконанні умови (2) відбуватиметься додаткове зворотно-поступальне переміщення додаткової рухомої ланки 8 в середині робочої ємкості на відповідну амплітуду l_A . Таким чином, в процесі експлуатації машини відстань між геометричними осями кріплення вилки до робочої ємкості l_{BB} за зворотно-поступального переміщення додаткової рухомої ланки 8 в середині робочої ємкості 9, буде циклічно змінюватиметься від мінімального $l_{BB(MIN)}$ до максимального $l_{BB(MAX)}$ значення. За один повний оберт ведучого валу машини відбуватиметься чотири зворотно-поступальні переміщення додаткової рухомої ланки 8 в середині робочої ємкості 9.

Максимальна відстань $l_{BB(MAX)}$ виникатиме при таких положеннях рухомих ланок машини, коли повздовжня вісь робочої ємкості буде проектуватися на вертикальну площину станини в натуральну величину (рис. 3а), мінімальна відстань $l_{BB(MIN)}$ буде утворюватися, коли одна із осей кріплення ведучої чи веденої вилки буде горизонтальною, а інша вертикальною (рис. 3б). Позначення ланок на рис. 3 співпадає з позначеннями на рис. 2.

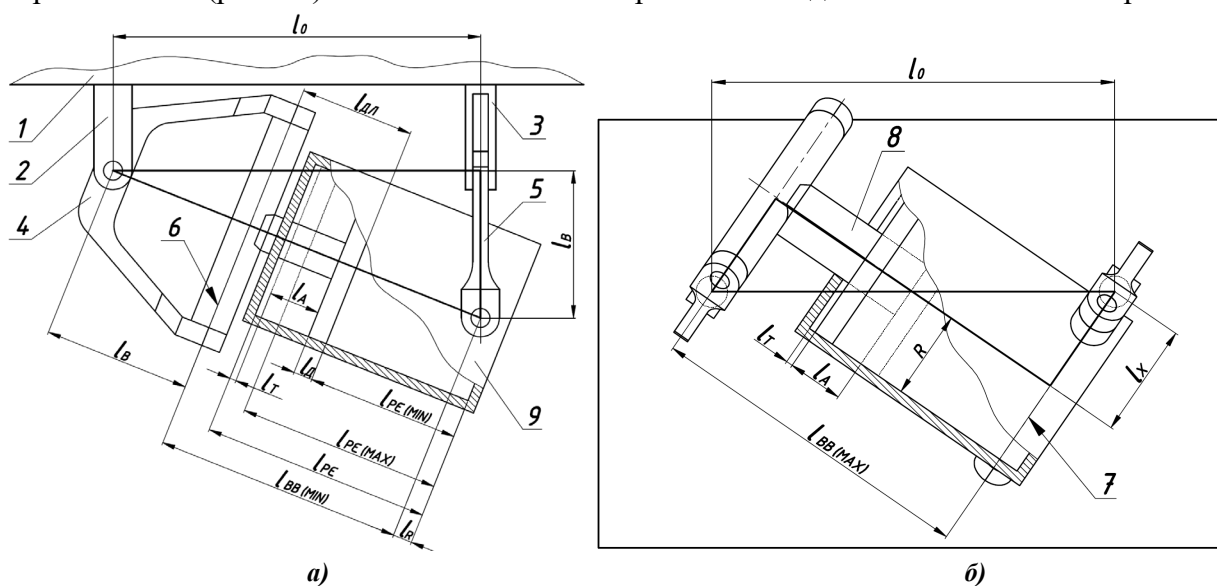


Рис. 3. Розроблена машина для обробки деталей: а – вид зверху, б – вид спереду

На основі прямокутного трикутника, утвореного у горизонтальній площині (рис. 3а), можна записати вираз для визначення відстані між осями ведучого та веденого валів l_0 :

$$l_0 = \sqrt{(l_{\text{BB(MIN)}} + l_B)^2 - l_B^2}. \quad (3)$$

Виходячи з геометричних міркувань (рис. 3б), максимальну відстань $l_{\text{BB(MAX)}}$ між геометричними осями кріплення вилок до робочої ємкості можна визначити за виразом:

$$l_{\text{BB(MAX)}} = \sqrt{l_0^2 - 4l_X^2}, \quad (4)$$

де l_X – відстань в проекції на вертикальну площину станини між віссю обертання ведучого (ведучого) валу та віссю робочої ємкості. Попередньо, в роботі [1] отримано вираз для визначення довжини l_X :

$$l_X = l_B \cos 45^\circ. \quad (5)$$

Підставимо значення виразу (5) у рівняння (4):

$$l_{\text{BB(MAX)}} = \sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2}. \quad (6)$$

Як зазначалося вище, в процесі експлуатації машини буде змінюватися відстань між геометричними осями вилок, що відбуватиметься за рахунок зворотно-поступального переміщення додаткової рухомої ланки – поршня в середині робочої ємкості. Амплітуду l_A зворотно-поступального переміщення додаткової рухомої ланки вздовж стінок робочої ємкості можна визначити наступним чином:

$$l_A = l_{\text{BB(MAX)}} - l_{\text{BB(MIN)}}. \quad (7)$$

Підставимо у рівняння (7) вираз (6):

$$l_A = \sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2} - l_{\text{BB(MIN)}}. \quad (8)$$

Запишемо рівняння (8) з урахуванням виразу (3):

$$l_A = \sqrt{(l_{\text{BB(MIN)}} + l_B)^2 - l_B^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2} - l_{\text{BB(MIN)}}. \quad (9)$$

За допомогою рівняння (9) можна розрахувати амплітуду l_A зворотно-поступального переміщення додаткової рухомої ланки – поршня вздовж внутрішньої стінки робочої ємкості, що є необхідним під час конструювання даного типу обладнання.

На рис. 3а представлено таке положення рухомих ланок машини, при якому додаткова рухома ланка, по відношенню до робочої ємкості, буде знаходитися в одному з крайніх положень (крайне ліве положення), в результаті чого лівий внутрішній торець робочої ємкості буде максимально наближеним до торця додаткової рухомої ланки. Для того, щоб унеможливити зіткнення торця робочої ємкості з торцем додаткової рухомої ланки та подальше заклинювання механізму машини в цілому, необхідно забезпечити утворення відповідного зазору l_T між внутрішнім торцем ємкості та торцем додаткової рухомої ланки (рис. 3а). Величину l_T раціонально приймати в межах приблизно 10% від довжини $l_{\text{BB(MIN)}}$:

$$l_T = 0,1 \cdot l_{\text{BB(MIN)}}. \quad (10)$$

Специфіка даної машини заключається в тому, що в процесі її роботи буде циклічно змінюватися корисний об'єм робочої ємкості V_{PE} від максимального $V_{\text{PE(MAX)}}$ до мінімального $V_{\text{PE(MIN)}}$. Це необхідно враховувати при конструюванні, як самого обладнання, так і при

розробці технологічних процесів обробки деталей на стадії проектування, зокрема при встановленні раціональної межі заповнення ємкості робочим масивом. Тому необхідно отримати вирази для можливості визначення корисного об'єму ємкості. Робоча ємкість має циліндричну форму, відповідно розрахувати її повний об'єм можна наступним чином:

$$V_{PC} = \pi \cdot R^2 \cdot l_{PC}, \quad (11)$$

де R – внутрішній радіус робочої ємкості, l_{PC} – відстань між внутрішніми протилежними торцями робочої ємкості.

За виразом (11) можна розрахувати об'єм робочої ємкості без урахування розташованої в середині неї додаткової рухомої ланки.

За рахунок зворотно-поступального переміщення додаткової рухомої ланки в середині робочої ємкості, корисний об'єм робочої ємкості буде обмежений її внутрішньою циліндричною стінкою, торцем робочої ємкості, а також рухомим торцем додаткової рухомої ланки. Від так, відстань між торцем робочої ємкості та рухомим торцем додаткової рухомої ланки буде змінюватися від мінімальної $l_{PC(MIN)}$ до максимальної $l_{PC(MAX)}$:

$$l_{PC(MIN)} = l_{PC} - l_T - l_A - l_D. \quad (12)$$

$$l_{PC(MAX)} = l_{PC} - l_T - l_D. \quad (13)$$

Відповідно, з урахуванням виразів (12) та (13), можна записати вирази для розрахунку мінімального $V_{PC(MIN)}$ та максимального $V_{PC(MAX)}$ корисного об'ємів робочої ємкості:

$$V_{PC(MIN)} = \pi \cdot R^2 \cdot (l_{PC} - l_T - l_A - l_D). \quad (14)$$

$$V_{PC(MAX)} = \pi \cdot R^2 \cdot (l_{PC} - l_T - l_D). \quad (15)$$

Фактично основний геометричний параметр машини, яким необхідно задаватися на початку її конструювання – це мінімальний об'єм робочої ємкості. Таким чином, на основі мінімального об'єму робочої ємкості $V_{PC(MIN)}$, можна розрахувати $l_{PC(MIN)}$:

$$l_{PC(MIN)} = \frac{V_{PC(MIN)}}{\pi \cdot R^2}. \quad (16)$$

Виходячи з геометричних міркувань (рис. 3а), запишемо нерівність (2) наступним чином:

$$l_{PC(MIN)} + l_{ДЛ} - l_R \succ l_B, \quad (17)$$

де $l_{ДЛ}$ – довжина додаткової рухомої ланки від вісі в обертальній кінематичній парі з'єднання з ведучою вилкою до площини торця, який виконує зворотно-поступальне переміщення в середині робочої ємкості, l_R – відстань від геометричної вісі кріплення веденої вилки з робочою ємкістю до правого зовнішнього торця робочої ємкості, при відповідному положенні рухомих ланок машини. Величину l_R слід приймати в межах приблизно 15% від довжини $l_{PC(MIN)}$.

Запишемо нерівність (17) з урахуванням рівняння (16), а також з урахування відсоткового значення l_R :

$$0,85 \cdot \frac{V_{PC(MIN)}}{\pi \cdot R^2} + l_{ДЛ} > l_B. \quad (18)$$

Вираз (3) з урахуванням лівої частини нерівності (18) буде мати вигляд:

$$l_0 = \sqrt{\left(\left(0,85 \cdot \frac{V_{PC(MIN)}}{\pi \cdot R^2} + l_{ДЛ} \right) + l_B \right)^2 - l_B^2}. \quad (19)$$

Таким чином, дотримуючись нерівності (18) можна забезпечити безперешкодне функціонування машини без заклинювання її просторового механізму, а за виразами (9) та (13) розрахувати необхідні конструктивні параметри машини.

Висновки.

1. Представлено один з можливих варіантів звільнення просторового механізму галтувальної машини від надлишкового зв'язку.

2. Виконано синтез з подальшим аналітичним дослідженням семиланкового просторового механізму із застосуванням додаткової рухомої ланки. Розроблено нову конструкцію машини для обробки деталей, з об'ємом робочої ємкості, який змінюється в процесі виконання технологічних операцій.

3. На основі аналітичного дослідження отримані математичні залежності для розрахунку основних конструктивних параметрів машини, отримана нерівність, дотримуючись якої, можна забезпечити безперешкодне функціонування машини без заклинювання її просторового механізму. Дані залежності можуть бути використані відповідними машинобудівними підприємствами під час проектування такого типу обладнання.

Література

1. 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;
2. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. // Монография – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с;
3. 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;
4. Залюбовський М. Г. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2019. – №6 (140). – С. 9 –

References

1. Zalyubovskiy, M., Panasyuk, I., & Malyshev V. (2007). *Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei: monografiia* [Machines with complex movement of working capacities for processing of polymer parts]. Kyiv [in Ukraine];
2. Pershin, V., Odolko, V., & Pershina, S. (2009). *Pererabotka syupuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Processing bulk materials in drum type machines]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian];
3. Zalyubovskiy MG, Panasyuk IV, Sukhenko AN, 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*

- 17;
5. 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;
6. 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;
7. 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;
8. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. – №2. Vol 132,– С. 24-32;
9. 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;
10. 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;
11. 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;
12. 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;
13. M. G. Zalyubovskii. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54 – 64;
14. M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, M. Cook, A. Technologies and Design – Bulletin of the KNUVD, 6, 9 – 17 [in Ukraine];
5. Burmistenkov, O. (2007). *Vyrobnytstvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereynii 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 (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., Klaptsov, 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,

Ingram, E. H. Stitt. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of Turbulent Mixer Motion using Positron Emission Particle Tracking, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 59, No. 3 (2010), pp. 217-238;
15. Артоболевский И.И. Теория машин и механизмов. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
16. Патент №133925, МПК В01F 11/00 (2019.01), В24В 37/07 (2019.01). Машина для обработки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В., заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – №u201811703; заяв. 28.11.2018, опуб. 25.04.2019, бюл. № 8;

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 Turbulent Mixer Motion using Positron Emission Particle Tracking, CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences. [in English];

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.

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»

**МАШИНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С СЕМИЗВЕННЫМ
ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МЕХАНИЗМОМ - СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ**

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. Синтез семизвеного пространственного статически определенного механизма без избыточного (пассивного) связи с дополнительным подвижным звеном машины для обработки деталей с последующим аналитическим исследованием его основных конструктивных и геометрических параметров.

Методика. Использован аналитический метод исследования на основе геометрического и структурного синтеза пространственного семизвеного статически определенного механизма с дополнительным подвижным звеном без избыточной связи машины для обработки деталей, выполнено 3D моделирование машины в системе автоматизированного проектирования SolidWorks 2016.

Результаты. На основе структурного синтеза предложена конструкция семизвеного пространственного статически определенного механизма с дополнительным подвижным звеном машины для обработки деталей, в кинематической цепи пространственного механизма отсутствует избыточная связь, выполнено 3D моделирование машины в системе автоматизированного проектирования SolidWorks 2016. Проведено аналитические исследования основных геометрических и конструктивных параметров разработанной машины.

Научная новизна. Установлена взаимосвязь между различными геометрическими параметрами пространственного семизвеного статически определенного механизма, что дает

возможность рассчитать оптимальные соотношения длин звеньев механизма для обеспечения беспрепятственного функционирования машины без заклинивания ее пространственного механизма

Практическая значимость. Разработана новая конструкция машины для обработки деталей, в основе которой используется семизвенный пространственный статически определенный механизм с дополнительным подвижным звеном без избыточной связи. Получены математические зависимости для расчета ее основных конструктивных и геометрических параметров. Данные зависимости могут быть использованы соответствующими машиностроительными предприятиями на стадии проектирования такого типа оборудования.

Ключевые слова: избыточная связь, семизвенный пространственный механизм, возвратно-поступательное перемещение, рабочая емкость.

MACHINE FOR PROCESSING PARTS WITH A SEVEN-LINK SPATIAL MECHANISM - SYNTHESIS AND RESEARCH

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. Synthesis of a seven-link spatial statically determined mechanism without redundant (passive) connection with an additional moving link of a machine for processing parts, followed by an analytical study of its main structural and geometric parameters.

Methodology. An analytical research method was used based on the geometric and structural synthesis of a spatial seven-link statically defined mechanism with an additional movable link without redundant communication of the machine for processing parts; 3D modeling of the machine was performed in the SolidWorks 2016 computer-aided design system.

Results. On the basis of structural synthesis, the design of a seven-link spatial statically defined mechanism with an additional movable link of the machine for processing parts is proposed, there is no redundant connection in the kinematic chain of the spatial mechanism, 3D modeling of the machine is performed in the CAD system SolidWorks 2016. Analytical studies of the main geometric and design parameters of the developed machine are carried out.

Scientific novelty. The relationship between various geometric parameters of the spatial seven-link statically determined mechanism is established, which makes it possible to calculate the optimal ratio of the lengths of the links of the mechanism to ensure the smooth functioning of the machine without jamming its spatial mechanism

Practical significance. A new design of a machine for processing parts has been developed, based on a seven-section spatial statically determined mechanism with an additional moving link without redundant communication. Mathematical dependences are obtained for calculating its basic design and geometric parameters. These dependencies can be used by the corresponding machine-building enterprises at the design stage of this type of equipment.

Key words: excess communication, seven-link spatial mechanism, reciprocating movement, working capacity.

УДК 536.65

БУРМІСТЕНКОВ О.П., ДЕМІШОНКОВА С.А., СТЕПАНЧУК О.М.
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ В ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРОПОБУТОВОЇ ТЕХНІКИ

Мета. Метою роботи є поліпшення роботи пристроїв для укладання волосся, яке спрямоване на підвищення ефективності укладання волосся під дією досить високих температур з завданням йому найменшої шкоди. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі: проаналізовано взаємозв'язок фізичних властивостей волосся і температурних режимів плойки; експериментально досліджено розподілення температури плойки при нагріві і охолодженні; експериментально досліджено розподілення температури плойки при нагріві її з сухим волоссям і зі зволуженим волоссям.

Методика. У роботі використані методи математичного моделювання, методи математичної фізики, методи експериментальних досліджень з обробкою результатів експерименту за допомогою сучасного програмного продукту та комп'ютерної техніки.

Результати. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження довели необхідність рівномірного температурного поля на поверхні робочої поверхні для досягнення необхідного результату. Доведено необхідність регулювання температури в пристроях для роботи з волоссям.

Наукова новизна. Обґрунтовано можливість застосування установки для експериментальної оцінки регулювання температури в пристроях для роботи з волоссям, що в значній мірі збільшить час безперервної роботи пристрою та знизить витрати електроенергії.

Практична значимість. Розроблено стенд для дослідження та проведення аналізу різних температурних режимів електро побутових приладів. Застосована схема термостата для регулювання температури в пристроях для роботи з волоссям. Доведено, що потрібно обирати температуру у відношенні до стану та типу волосся, щоб не завдати йому великої шкоди. Завдяки малогабаритності, економічним та технічним показникам, даний стенд є зручним у експлуатації при дослідженні температурних режимів в пристроях для роботи з волоссям в робочому просторі, а також сприяє більш сучасному та демонстративному навчанню. Запропоновано використовувати двопозиційний закон регулювання температури для поверхонь робочих органів.

Ключові слова: електро побутова техніка, плойка, температура, робочі органи, експеримент, теплові потоки.

Вступ. В даний час важко уявити собі квартиру, де б не використовувалися якісь види електро побутової техніки: від приладів для особистої гігієни (фени, плойки, стаєр і т.п.) до пральних машин і холодильників. Електро побутова техніка міцно увійшла в наше життя і є невід'ємною її частиною. Особливе місце займають прилади призначені для догляду за жіночою зачіскою, надання їй певної краси і шарму. Зокрема, привертають уваги такі пристрої для укладання волосся, як плойки, утюжки, стайлери, оскільки вони найбільш широко використовуються. Основним робочим елементом таких пристроїв є нагрівальні елементи, які виконані у певній формі.

Відповідно зі зростанням вимог до технічного рівня і безпеки для здоров'я волосся пристроїв для його укладання, постає завдання забезпечити рівномірне нагрівання плойки по всій її довжині до заданої усталеної температури з можливістю подальшого нагріву без завдання шкоди волоссям.

Фізико - механічні властивості волосся залежать від безлічі факторів: жирності, структури (тонкі, грубі), пігментації і т.п. Кожному типу волосся повинна відповідати

відповідна температура поверхні плойки. Дослідження температурних режимів існуючих пристроїв и розробка системи автоматичного керування температурою в них, являється актуальним завданням.

Постановка завдання. В даний час існують різні види укладання волосся і відповідно різні види інструментів для їх здійснення. Інструменти носять назви: щипці, щітки, плойки, утюжки, стайлери. З їх функціональним призначенням і особливостями можна познайомитися в спеціальній літературі і на сайтах реклами [1-4].

У всіх вище перелічених пристроях є один загальний елемент - нагрівач, так як укладання волосся найкращим чином здійснюється під дією тепла. Нагрівач, як правило, виконаний у вигляді циліндра або пластини тих чи інших розмірів (від 10 до 35 мм в перетині і до 100 - 200 мм в довжину) з вбудованим всередину джерелом тепла: ніхромовими спіралями або діелектричними пластинами. Робочі поверхні нагрівачів мають різні покриття: турмалинове, турмалиново-керамічне, тефлонове, керамічно-тефлонове і інші.

Всі розглянуті види нагрівачів використовуються для обробки певного типу волосся. Виділено основні типи волосся: тонке волосся; сухе волосся; ламке, посічене волосся; жирне волосся; фарбоване волосся. В залежності від особливостей кожного типу волосся, використовуються пристрої для його укладання (таблиця 1).

Таблиця 1

Фізичні властивості волосся і параметри пристроїв для його укладання

Тип волосся	Функціональні параметри пристроїв для укладання волосся			
	Температура нагріву, °С	Діаметр стержня, мм	Покриття	Додаткові функціональні особливості
Тонке волосся	Не вище 120	12-13	Турмалиново-керамічне покриття	Гарачий обдув
Сухе волосся	100-150	12-18	Турмалинове покриття	Функція подачі пару
Жирне волосся	100-180	13-25	Тефлонове покриття	Холодний обдув
Ламке, посічене волосся	110-120	12-15	Тефлонове покриття	Функція подачі пару
Густе волосся	120-230	15-25	Турмалинове покриття	Подача пару
Фарбоване волосся	100-150	13-22	Керамічно-тефлонове покриття	Іонна технологія
Нормальне волосся	100-230	12-22	Турмалиново-керамічне покриття	Холодний обдув

Температура на поверхні плойки (нагрівача) не повинна перевищувати значень вказаних в таблиці 1 для певного типу волосся, щоб не потрапити в деструкцію волосся. Необхідна температура досягається або виведенням температури нагрівача на необхідний

сталій режим роботи і надалі підтримується за допомогою системи автоматичного управління [5].

Таким чином нагрівач і локони волосся на його поверхні є об'єктом дослідження, так як температура на поверхні нагрівача визначає тривалість і якість виконання відповідної операції.

Плойка - це, як правило, порожній циліндр, з розташованим всередині нього джерелом теплової енергії. Температура на його поверхні і визначає процес впливу на локони волосся, тому аналітичне та експериментальне вивчення розподілу температури всередині і на поверхні циліндра є важливим завданням.

Результати дослідження. Припустимо, що плойка має циліндричну форму і разом з нагрівачем є ізотропним тілом. Для вивчення температурного режиму в ізотропних тілах можна скористатися рівнянням нестационарної теплопровідності Фур'є і вирішивши його отримати розподіл температури за координатами циліндра і часу. В даному випадку (так як немає жорстких вимог до коливання температури щодо необхідного значення) можна спростити завдання і скористатися рівнянням теплового балансу [6, 7]:

$$P\partial t = CM\partial\tau + \alpha S\partial t, \quad (1)$$

де $CM\partial\tau$ - тепло, яке йде на нагрів самого приладу; $P\partial t$ - зміна кількості теплоти в часі; $\alpha S\partial t$ - тепло, яке розсіюється в навколишнє середовище; C - теплоємність сталі (матеріал циліндричного стержня); M - маса циліндричного стержня; α - коефіцієнт тепловіддачі сталі; S - площа бічної поверхні циліндра.

Рішення рівняння (1) має вигляд:

$$\tau = \frac{P}{\alpha S} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_{поч} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2)$$

де $T = \frac{CM}{\alpha S}$ - постійна часу нагріву; P - потужність пристрою для укладання волосся; $CM\partial\tau$ - тепло, яке йде на нагрів самого приладу; $\alpha S\partial t$ - тепло, яке розсіюється в навколишнє середовище; P - потужність пристрою для укладання волосся.

Для циліндра з внутрішнім джерелом тепла і наступними вихідними даними: $r = 8\text{мм}$; $r = 7\text{мм}$; $r = 9\text{мм}$; $h = 12,5\text{см}$; $\lambda = 45,4\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; $\alpha = 8\text{Вт}\cdot\text{м}^2\text{Вт/м}^2\text{К}$; $P = 12\text{Вт}$; $T_f = 21^\circ\text{C}$ проведено розрахунок зміни температури в часі в період нагріву (нестационарного режиму) рис.1. Графіки на рис.1 побудовані для двох постійних часу, отриманих аналітичним і експериментальним шляхами. Криві зміни температури носять експонентний характер і досягають сталого значення за досить тривалий проміжок часу.

Для дослідження впливу зовнішніх факторів при роботі плойки проведений експеримент, в якому використовувалися: вовняна тканина і локони волосся.

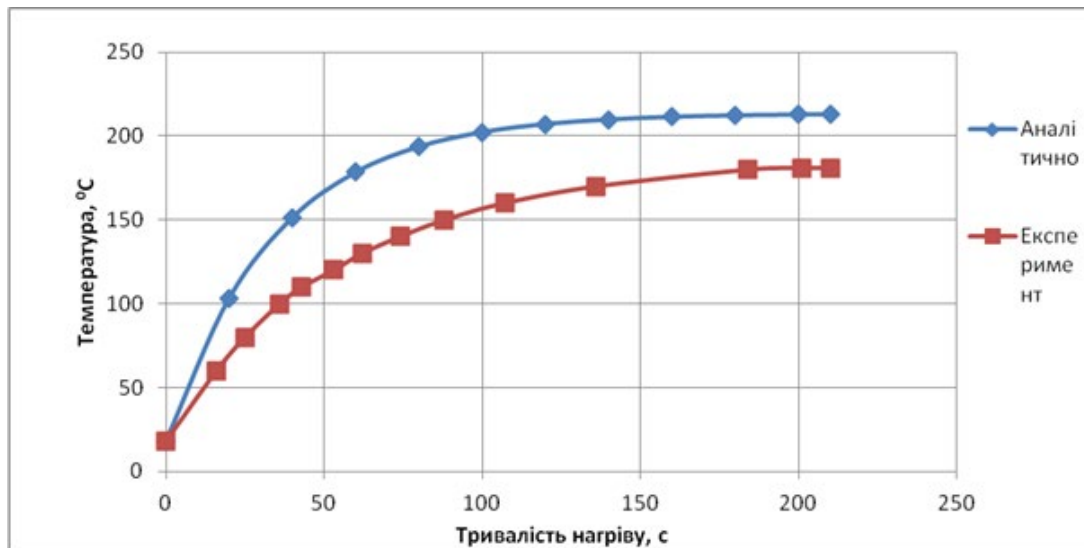


Рис.1. Графічне порівняння результатів аналітичних і експериментальних досліджень

Експеримент проводився з використанням стенда рис.2.

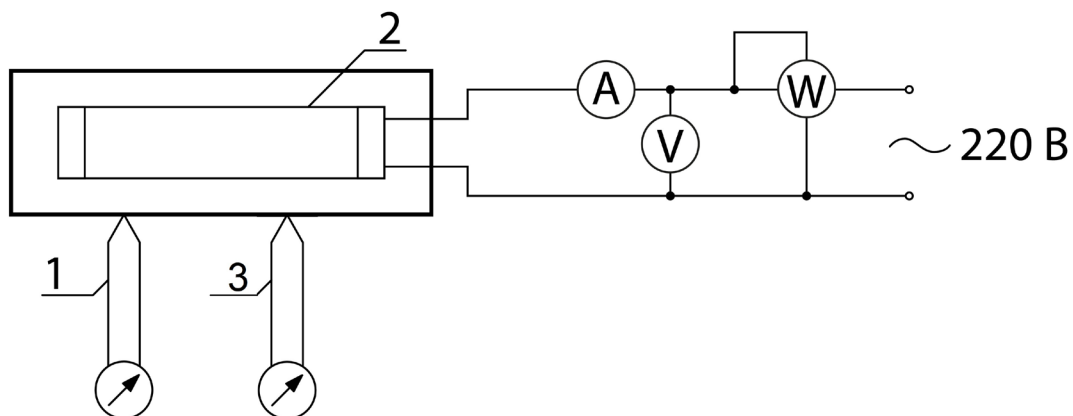


Рис.2. Стенд для дослідження процесу нагрівання побутової плойки

1 – термометр 1, 2 – нагрівальний елемент (ТЕН),

3 – термометр 2

Для експериментальних досліджень використовувалися прилади для вимірювання потужності нагрівача і температури [8 - 10].

Для отримання фактичного розподілення температури було проведено такі експериментальні дослідження:

- 1) нагрів плойки до усталеної температури;
- 2) охолодження плойки до температури навколишнього середовища;
- 3) плойки зі зразком шерстяної тканини;
- 4) нагрів плойки з волоссям;
- 5) нагрів плойки зі зразком зволоженої тканини;
- 6) нагрів плойки зі зволоженим волоссям.

Нагрів плойки до усталеної температури. Плойку діаметром 18 мм, довжиною 12,5

мм (нагрівальна частина), споживаною потужністю 12 Вт включали в мережу змінного струму 220 В. Охолодження плойки здійснювалося за аналогічних умов, тільки в оберненому напрямку. Усталена температура нагріву була початковою температурою охолодження. Плойка відключалася від мережі живлення і фіксувалася її температура до тих пір, поки вона не охолодилася до кімнатної температури.

Нагрів плойки зі зразком шерстяної тканини. Було повторено дослід з нагрівом плойки до усталеної температури, потім на нагріту до усталеної температури плойку одягалася тканина і знову фіксувалося значення температури. Нагрів плойки з волоссям.

Нагрів плойки зі зволоженою тканиною. Дослідження проводилися аналогічно, тільки перед тим, як одягати тканину на плойку вона зволожувалася спреєм для укладки волосся.

В результаті експериментальних досліджень було отримано графічні залежності, які характеризують зміну температури плойки. На рис. 3–6 подано апроксимовані графіки.

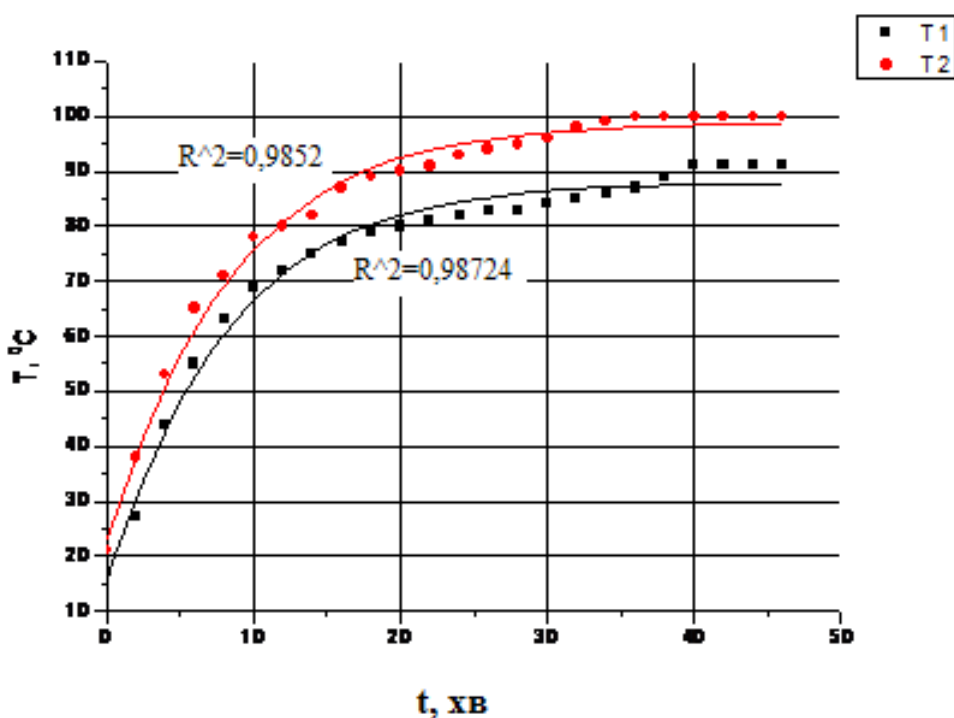


Рис. 3. Графік залежності температури плойки від часу при нагріві до усталеного режиму

Із отриманих графічних залежностей видно, що усталена температура плойки дорівнює 100 °С, температура плойки виходить на усталений режим тоді, коли кількість теплоти, що виділяється дорівнює кількості теплоти, яка йде на нагрів приладу і кількості теплоти, що розсіюється в навколишнє середовище, розподілення температури при нагріві має експоненціальний характер. На усталений режим температура плойки виходить за період часу рівний 40 хв. Різниця показників між першою і другою термопарами пояснюється тим, що перша термопара підключена з торця плойки, де відбувається більший тепловідвід в навколишнє середовище, а друга термопара – ближче до основи плойки. Тобто, для дослідження було вибрано дві позиції на поверхні об'єкту.

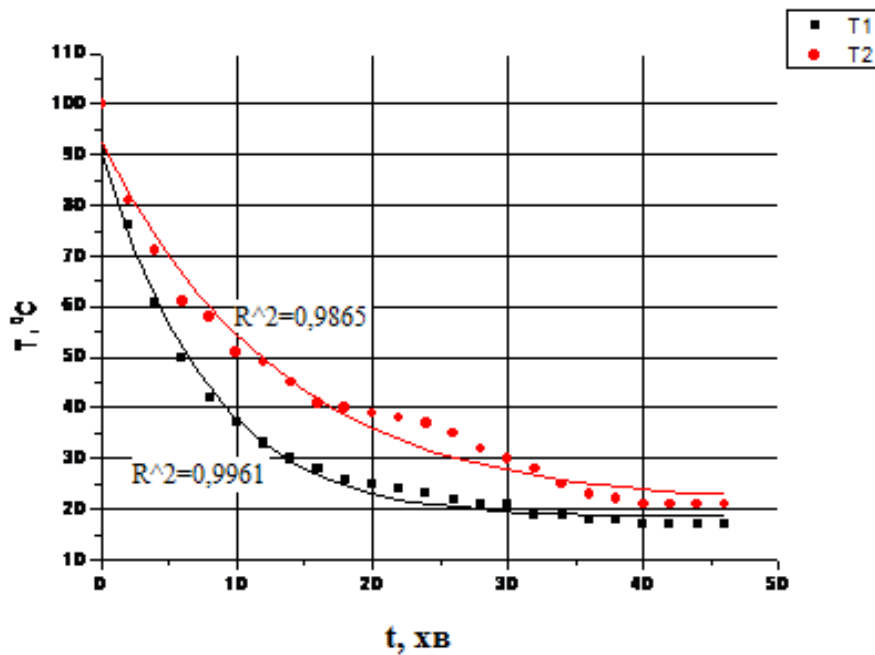


Рис. 4. Графік залежності температури плойки від часу при охолодженні до кімнатної температури

Охолодження плойки до температури навколишнього середовища відбувається за період часу рівний 40 хв. Температурна залежність має вигляд експоненти. При досягненні температури, що дорівнює кімнатній, плойка виходить на усталений режим.

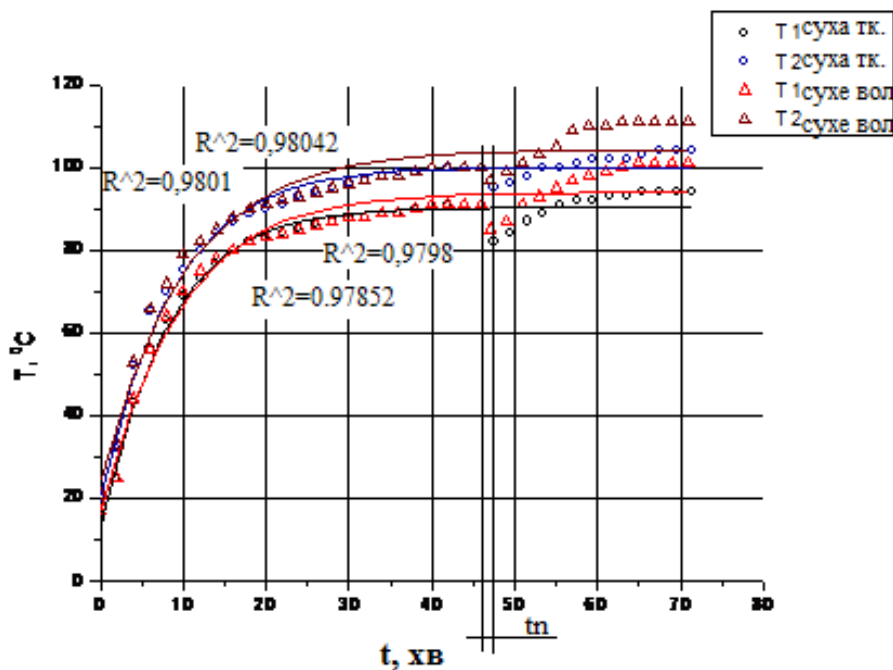


Рис. 5. Графік залежності температури плойки від часу при нагріві її з сухою тканиною і сухим волоссям

На графіку tn – час, за який на плойку накручувалися волосся і одягалася ткачина, $tn = 1$ хв. На цьому проміжку спостерігається падіння температури, оскільки порушується контакт термопар з поверхнею плойки.

Нагрів плойки з тканиною характеризується тим, що з виходом на усталений режим, на плойку накручується шерстяна тканина, яка своєю структурою дещо нагадує волосся, за період часу поки ця тканина одягається відбувається деяке падіння температури, а потім вона знову зростає і виходить на усталений режим, який на кілька градусів відрізняється від усталеного режиму самої плойки.

При накручуванні на пристрій волосся, його температура зростає ще більше, ніж з тканиною, це відбувається тому, що порушується тепловий баланс, оскільки волосся являється ізолюючим матеріалом між поверхнею плойки і навколишнім середовищем. Так як у волосся невисока теплопровідність, то тепловіддача в навколишнє середовище зменшується і відповідно температура нагріву приладу збільшується, вона на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ вища за усталену температуру самої плойки, що ми й бачимо на графіку.

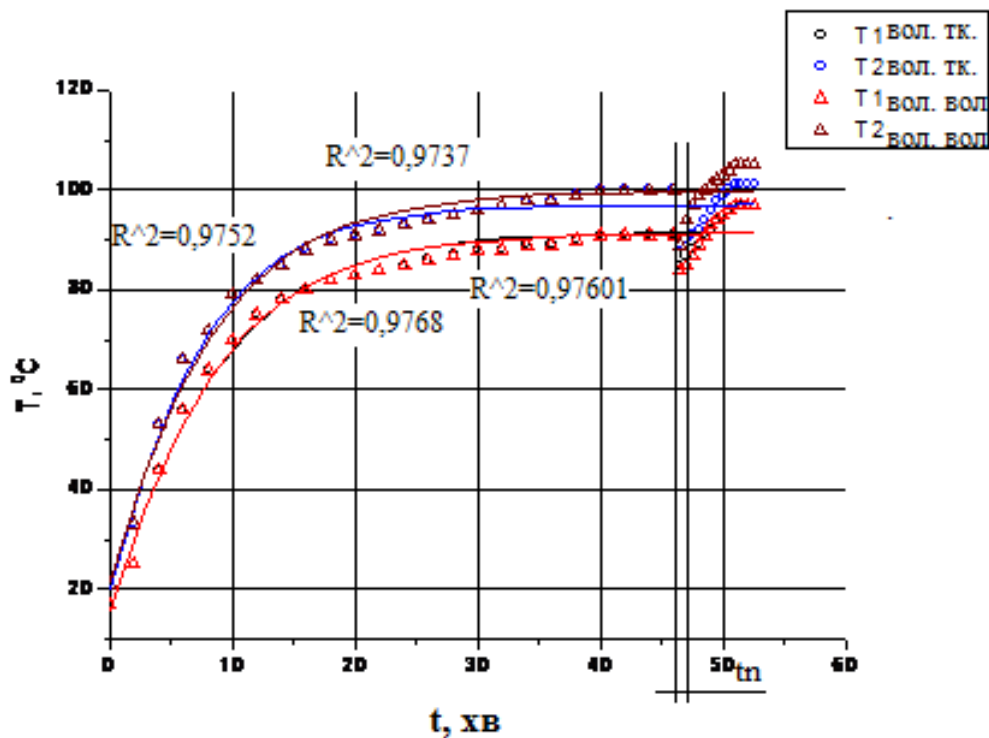


Рис. 6. Графік залежності температури плойки від часу при нагріві її зі зволоженою тканиною та зволеним волоссям

На графіку tn – час, за який на плойку накручувалися волосся і одягалася ткачина, $tn = 1$ хв. З графіка нагріву пристрою зі зволоженою тканиною видно, що при накручуванні на плойку тканини, температура приладу дещо падає, очевидно це відбувається через різницю температур пристрою і вологої тканини, а коли тканина нагрівається з неї випаровується волога і температура плойки знову починає зростати, але не так швидко як це відбувається з

сухою тканиною, оскільки певна кількість тепла йде на випаровування вологи, коли волога повністю випарувалася, температура вийшла на усталений режим, який на кілька градусів вище від усталеного режиму самої плойки.

З графіку нагріву пристрою зі зволеним волоссям, видно, що температура спочатку значно спадає, це відбувається через різницю температур приладу і вологого волосся, порушується стан термодинамічної рівноваги і температура приладу спадає, але це відбувається до тих пір, поки волосся добре не прогріється і з нього не випарується волога, тоді температура починає зростати і знову досягнувши теплового балансу виходить на сталий режим.

Підсумовуючи результати експериментальних досліджень, можна сказати, що для ефективного і безпечного укладання волосся, температуру плойки потрібно підтримувати постійною, причому такою, яка буде на 10–20 °С нижче усталеної температури самої плойки, оскільки, при накручуванні на пристрій волосся, його температура продовжує зростати за рахунок високої теплопровідності волосся. Важливо також враховувати фізичний стан волосся, оскільки це дуже впливає на його теплопровідність (волосся сухе, жирне і т. д.).

В результаті експериментальних і аналітичних досліджень було отримано розподілення температури плойки циліндричної форми. Як при експериментальних дослідах так і при аналітичному розрахунку отримано деякі графічні залежності, які за деякий проміжок часу виходять на усталений режим. Для розрахунків і порівняння даних використано експериментальні дані з вищими значеннями температури, оскільки саме підвищення температури нас цікавить.

Якщо розглянути розрахунок стаціонарного режиму плойки, де розподілення температури залежить тільки від радіальної координати, то видно, що максимальне значення температури спостерігається в точці, коли радіус циліндра дорівнює нулю, тобто, це температура безпосередньо на нагрівальному елементі, потім по мірі віддалення від центру тіла, вона плавно спадає і, наближаючись до поверхні (що дорівнює зовнішньому радіусу циліндра) виходить на усталений режим, температура при цьому дорівнює приблизно 83 °С, це майже на 20 °С менше від усталеної температури, визначеної експериментальним шляхом, таку розбіжність можна пояснити тим, що при розрахунку не враховується, який спай термопари: холодний чи гарячий. При експериментальних дослідженнях за вихідну температуру приймалася температура навколишнього середовища (кімнатна температура).

Якщо розглядати нестационарний режим роботи, то видно, що за аналітичним розрахунком плойка нагрівається до температури 100 °С (експериментального значення усталеної температури) за період часу, рівний приблизно 25 хв. Тобто, теоретично, за період часу 40 хв. плойка може нагріватися до значно вищої температури, таку розбіжність можна пояснити інерційністю деяких складових рівняння теплового балансу: так, наприклад, значення тепловіддачі, яке прийнято постійним, насправді може коливатися у дуже широких межах, оскільки сам процес нагріву різних матеріалів має досить складний характер; значення теплоємності прийнято для сталі, оскільки невідомо достовірно, з якого сплаву виготовлена нагрівальна частина плойки, тому це також призводить до деякої похибки в розрахунку.

Висновки. Було проаналізовано фізичні властивості різних типів волосся і визначено, що кожен тип волосся вимагає конкретних температурних режимів, функціональних і конструктивних особливостей пристроїв для його укладання.

На етапі аналітичного розрахунку зміни температури в площі зроблено розрахунок нестационарної зміни температури тіла циліндричної форми в результаті чого отримано графічні залежності, які дають картину можливого розподілення температури в досліджуваному пристрої.

В результаті експериментальних досліджень отримано графічні залежності зміни температури плойки з часом: при нагріві, охолодженні, нагріві з тканиною і з волоссям, які дали можливість встановити: при накручуванні на плойку тканини або волосся, після досягнення нею теплового балансу, температура пристрою продовжує зростати, вона на 10°C вища температури самої плойки.

Визначено, що температуру плойки необхідно підтримувати на заданому рівні, враховуючи при цьому фізичний стан волосся, це можна реалізувати за допомогою замкнутої схеми структурної системи регулювання.

Нагрів плойки до сталого значення носить тривалий характер і процес інерційний (як будь-який процес пов'язаний з нагріванням тіла) тому доцільно використовувати для регулювання температури двопозиційний закон регулювання з використанням відомих схем термостатів [11 - 13].

Таким чином, проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють рекомендувати, для більш якісного і безпечного укладання, встановлювати у плойках для корекції роботи терморегулятора датчики фізичних властивостей волосся, які й будуть визначати необхідну температуру поверхні пристрою.

Література

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.braun.com>
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.saiteg.com>
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eurocomfort.com.ua>
4. Как правильно выбрать утюжок для волос? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.moyo.ua/news/kak_pравильно_vybrat_utyuzhok_dlya_volos_6_punktov_na_kotorye_stoit_obratit_vnimanie.html
5. Боговский М.С. Уравнения математической физики. / Учебное пособие. – Москва: МФТИ, 2019. – 106 с.
6. Сипайло Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Сипайло Г. А., Санников Д. И., Жадан В.А. // М.: Высшая школа, 1989. – 229с.

References

1. URL: <http://www.braun.com> [in Russian].
2. URL: <http://www.saiteg.com> [in Russian].
3. URL: <http://www.saiteg.com> [in Russian].
4. *Kak pravil'no vybrat' utyuzhok dlya volos?* [How to choose the right hair iron?]. URL: https://www.mo_yo.ua/news/kak_pравильно_vybrat_utyuzhok_dlya_volos_6_punktov_na_kotorye_stoit_obratit_vni_manie.html [in Russian].
5. Bogovskiy M.E. (2019) *Rivnyannyya matematichnoy fiziki*. [Bogovskiy M.E. Equivalent Mathematical Physics: Navchalny posibnik]. Moscow, [in Russian].
6. Sipaylo G. A., Sannikov D. I., Zhadan V.A. (1989) *Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines]. Moscow, [in Russian].
7. Kadymov Ya. B.(1968) *Perekhodnye protsessy v sistemakh s raspredelennymi parametram* [Transients in systems with distributed

7. Кадымов Я. Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами / М.: Наука, 1968. – 28с.
8. Сергеев С. А. Двухпозиционное регулирование температуры объектов с распределенными параметрами. М.: Энергия, 1975. – 96 с.
9. Посудін Ю.І. Прилади для вимірювання температури / Вінниця: 2010. – 85-89с.
10. Орлов И.В., Дубровный В.А. Основы технологии и автоматизации тепловой обработки швейных изделий. М.: Лёгкая индустрия, 1974.-226с.
11. Ремонт побутовых нагревательных устройств [Электронный ресурс]. – <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/1205>
12. Серета О.Г. Безконтактні елементи автоматики в електропобутовій техніці: / Навч. посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів. – Харків: НТУ «ХП», 2007. –250 с.
13. Лир Э. В. Электробытовые машины и приборы: / Лир Э. В., Петко И.В. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Техника, 1990 – 270 с.
- parameters]. Moscow, [in Russian].
8. Sergeev S. A. (1975) *Dvukhpozitsionnoe regulirovanie temperatury ob"ektov s raspredelennymi parametrami* [On-off temperature control of objects with distributed parameters]. Moscow, [in Russian].
9. Posudin Yu.I. (2010) *Priladi dlya vimiryuvannya temperaturi* [Adjust the temperature for vimiryuvannya]. Vinnytsya, [in Ukrainian].
10. Orlov I.V., Dubrovnyy V.A. (1974) *Osnovy tekhnologii i avtomatizatsii teplovy obrabotki shveynykh izdeliy* [Basics of technology and automation of thermal garment processing] Moscow, [in Russian].
11. *Remont pobutovikh nagrival'nykh pristroiv*. [Repair of household heating devices]. URL: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/1205>. [in Ukrainian].
12. Sereda O.G. (2007) *Bezkontaktni elementi avtomatiki v elektropobutoviy tekhnitsi*. Navch. posibnik dlya studentiv vishchikh tekhnichnikh navchal'nykh zakladiv [Contactless elements of automation in household appliances: Textbook. manual for students of higher technical educational institutions]. Kharkiv, [in Ukrainian].
13. Lear E. V., Petko IV (1990) *Elektrobytovye mashiny i pribory* [Household appliances and devices]. Kyiv, [in Russian].

DEMISHONKOVA S.

<https://orcid.org/0000-0001-5678-8114>
Kyiv National University of Technologies & Design

BURMISTENKOV O.

<https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>
Kyiv National University of Technologies & Design

STEPANCHUK O.

student
Kyiv National University of Technologies & Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОБЫТОВОЙ ТЕХНИКИ

БУРМИСТЕНКОВ А.П., ДЕМИШОНКОВА С.А., СТЕПАНЧУК О.Н.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Целью работы является улучшение работы устройств для укладки волос, которое направлено на повышение эффективности укладки волос под действием достаточно высоких температур с наименьшим для волос вредом. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проанализирована взаимосвязь физических свойств волос и температурных режимов плойки; экспериментально исследованы распределения температуры плойки при нагреве и охлаждении; экспериментально исследованы распределения температуры плойки при нагреве ее с сухими волосами и с увлажненными волосами.

Методика. В работе использованы методы математического моделирования, методы математической физики, методы экспериментальных исследований с обработкой результатов эксперимента с помощью современного программного продукта и компьютерной техники.

Результаты. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования доказали необходимость равномерного температурного поля на поверхности рабочей поверхности для достижения необходимого результата. Доказана необходимость регулирования температуры в устройствах для работы с волосами.

Научная новизна. Обоснована возможность применения установки для экспериментальной оценки регулирования температуры в устройствах для работы с волосами, что в значительной степени увеличит время непрерывной работы устройства и снизит затраты электроэнергии.

Практическая значимость. Разработан стенд для исследования и проведения анализа различных температурных режимов электробытовых приборов. Применена схема термостата для регулирования температуры в устройствах для работы с волосами. Доказано, что нужно выбирать температуру с учетом состояния и типа волос, чтобы не нанести им большой вред. Благодаря малогабаритности, экономическим и техническим показателям, данный стенд удобен в эксплуатации при исследовании температурных режимов в устройствах для работы с волосами в рабочем пространстве, а также способствует более современному и наглядному обучению. Предложено использовать двухпозиционный закон регулирования температуры поверхностей рабочих органов.

Ключевые слова: электробытовая техника, плойка, температура, рабочие органы, эксперимент, тепловые потоки.

RESEARCH OF TEMPERATURE REGIMES IN DEVICES OF ELECTRICAL HOUSEHOLD APPLIANCES

BURMISTENKOV O.P., DEMISHONKOVA S.A., STEPANCHUK O.M.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. The aim of the work is to improve the work of hair styling devices, which is aimed at increasing the efficiency of hair styling under the action of sufficiently high temperatures with the least damage to it. To achieve this goal, the following tasks were solved: the relationship between the physical properties of hair and temperature regimes of curling was analyzed; experimentally investigated the distribution of curling temperature during heating and cooling; the distribution of the temperature of the curling iron when heated with dry hair and with moist hair was experimentally studied.

Methodology. The methods of mathematical modeling, methods of mathematical physics, methods of experimental researches with processing of results of experiment by means of a modern software product and computer equipment are used in the work.

Findings. Analytical and experimental studies have shown the need for a uniform temperature field on the surface of the work surface to achieve the desired result. The necessity of temperature regulation in devices for work with hair is proven.

Originality. The possibility of using the installation for experimental evaluation of temperature control in devices for working with hair is substantiated, which will significantly increase the time of continuous operation of the device and reduce electricity consumption.

Practical value. A stand for research and analysis of different temperature regimes of electrical appliances has been developed. The thermostat circuit for temperature control in devices for work with hair is applied. It has been proven that you need to choose the temperature in relation to the condition and type of hair, so as not to cause great harm. Due to its small size, economic and technical indicators, this stand is easy to use when studying the temperature conditions in devices for working with hair in the work space, which contributes to more modern and demonstrative training. It is proposed to use the two-position law of temperature regulation for the surfaces of the working bodies.

Keywords: household appliances, curling iron, temperature, working bodies, experiment, heat fluxes.

УДК 620.97:621.31

КРАВЧЕНКО О.П.¹, МАНОЙЛОВ Е.Г.², БАБИЧ Г.О.¹,
МАЛИЙ Я.С.¹

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Інститут фізики напівпровідників ім. Лашкарьова В.Є., НАНУ

ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ

Мета. Створення електронної системи моніторингу та управління в системі електропостачання локального об'єкту для досягнення ефективного співвідношення між генерацією та споживанням електричної енергії.

Методика. При дослідженні використовувалась теорія електричних кіл та електронних схем.

Результати. Була створена електронна система моніторингу та управління електропостачанням в енергосистемі локального об'єкту. Система складається з трьох модулів: центрального процесору, модулю моніторингу параметрів навколишнього середовища та виконавчого модулю, який складається з вимірювального блоку (струм, напруга) та релейного блоку. Центральний процесорний модуль обробляє сигнали, що надходять від моніторингового та вимірювального блоків виконавчого модулю, обробляє їх та формує виконавчі команди на релейний блок для ввімкнення/вимкнення споживачів потужності, або генеруючих пристроїв. Розроблена система надає можливість, з одного боку, здійснювати максимальний відбір потужності від розподілених (відновлюваних) джерел енергії, та з іншого боку, здійснення гнучкого регулювання споживання потужності в енергосистемі локального об'єкту. для досягнення ефективного співвідношення між генерацією електричної енергії, що забезпечується розподіленими джерелами енергії і загальною розподільчою мережею, та сумарним споживанням пристроями навантаження.

Наукова новизна. Електронна система моніторингу та управління електропостачанням локального об'єкту дозволяє в режимі реального часу здійснювати моніторинг роботи компонентів генеруючої та споживаної потужності. Описані засоби забезпечують оптимальне функціонування електричної системи локального об'єкту за рахунок максимального використання системою потужності, що генерується сонячною батареєю. Крім того, пристрій забезпечує збір та переробку статистичної інформації для подальшого її використання в розробці прогностичних методів функціонування електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії.

Практична значимість. В результаті виконаної роботи була створена електронна система моніторингу та управління електропостачання в енергосистемі локального об'єкту з відповідним формуванням профілів генерації розподілених джерел енергії та необхідного споживання в режимі реального часу для забезпечення ефективного енергоспоживання згідно концепцій автономних розподілених мереж з відновлюваними джерелами енергії та Розумного Будинку.

Ключові слова: розподілені джерела енергії, відновлювані джерела енергії, ефективне енергоспоживання, система моніторингу, локальний об'єкт.

Вступ. В Україні зростаючими темпами імплементується політика енергоефективності на основі прийнятого закону про енергоефективність [1]. Раніше в Україні, як і у всьому світі, виконувалася політика енергозбереження, яка свої основні зусилля направляла на заощадження, збереження енергії, основною рисою якої було зменшення рівня енергоспоживання [2]. Такий підхід характеризується надмірним використанням вичерпних ресурсів та неефективним функціонуванням виробничих систем. Основним напрямком стає заміна концепції енергозаощадження концепцією енергоефективності. Так, міжнародний стандарт ISO 50001:2018 - «Energy management systems — Requirements with guidance for use» (Системи енергоменеджменту. Вимоги та

настанова щодо використання) встановлює вимоги до забезпечення енергоефективного функціонування визначеного енергетичного об'єкту. Очікуваним результатом використання такого стандарту повинно стати постійне поліпшення енергетичних характеристик систем енергоменеджменту [3]. Існуючі та діючі засоби енергоефективного управління електроенергетичними системами ще не досягли своєї функціональної довершеності, тому актуальною залишається задача, яка полягає в розробці засобів ефективного контролю генерації та споживання електричної енергії в системі енергоменеджменту локального об'єкту. Крім того, доцільність виконання таких досліджень обумовлюється розвитком енергоефективних систем генерації та споживання електричної енергії в рамках концепцій SMARTGRID [4,5] та SMARTHOUSE [6,7].

Постановка завдання. Основною характеристикою енергоефективної електричної системи є оптимальне співвідношення між згенерованою та спожитою потужностями. Ключовим критерієм є максимальне використання потужності відновлюваних джерел енергії для відповідного очікуваного профілю споживання. Щоб досягти цієї цілі, необхідно розробити пристрій для моніторингу та управління параметрами електроенергетичної системи локального об'єкту. Цей пристрій складається з взаємозв'язаної сукупності засобів (модулів), кожен з яких відповідає за певну визначену функцію (модулі управління, моніторингу параметрів та виконавчий модуль).

Таким чином, метою дослідження є розробка системи моніторингу електропостачання та споживання з відповідним формуванням профілів генерації та навантаження. Співставлення цих профілів реалізує алгоритм управління функціонуванням електроенергетичної системи локального об'єкту.

Результати дослідження. Електрична система локального об'єкту в загальному вигляді складається з системи генерації та системи навантаження. Система генерації - це генеруючі пристрої, до яких відносяться відновлювані джерела енергії (сонячні батареї (СБ), вітрогенератори (ВЕ)), дизельні генератори, акумуляторні батареї та загальна розподільча мережа; система споживання - це пристрої навантаження [8,9]. На рис.1 зображено загальну схему системи моніторингу та управління електропостачанням локального об'єкту.

Схема складається з двох шин: 1) електрична шина (ЕШ) поєднує систему електропостачання 230В (АС) змінної напруги, 2) комунікаційна шина (КШ) здійснює контроль системи та передачу даних. На ЕШ розташовані система споживання (навантаження Н1, Н2, Н3 ...) та розподілених джерел генерації електричної енергії. Система розподіленої генерації під'єднана до загальної мережі. На ЕШ розташовані додаткові елементи - датчики струму та напруги (червоні кільця), - електричні реле, які вмикають або вимикають навантаження та генерацію. Модуль керування, що розташований на КШ, обробляє сигнали датчиків згідно заданим алгоритмам. Персональний комп'ютер (ПК) служить для вводу та виводу інформації, сервер (хмарне сховище) призначений для резервного збереження та обробки інформації з можливістю віддаленого доступу. На рис.2 представлена структурно-функціональна схема електронної системи для забезпечення оптимального функціонування системи електропостачання локального об'єкту.

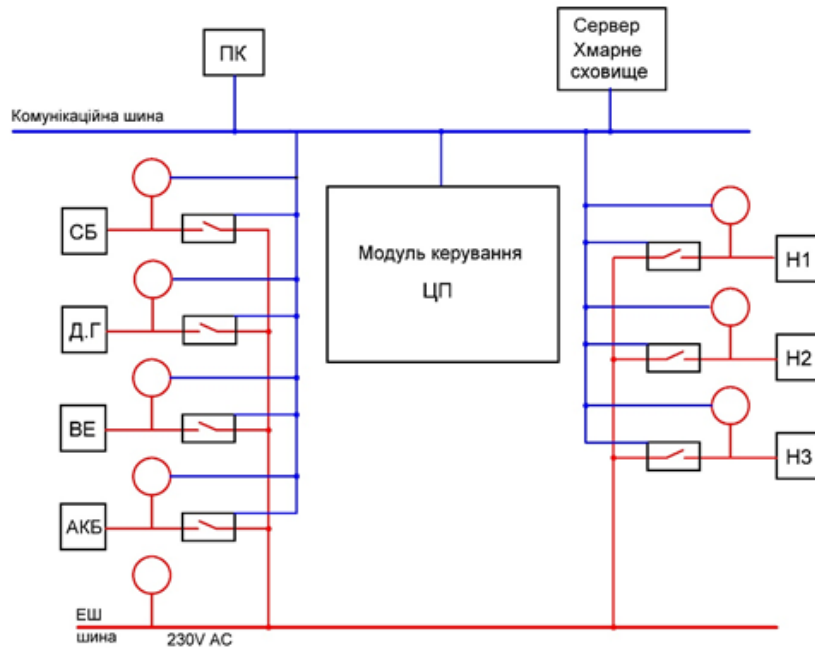


Рис.1. Загальна схема системи моніторингу та управління електропостачанням локального об'єкту

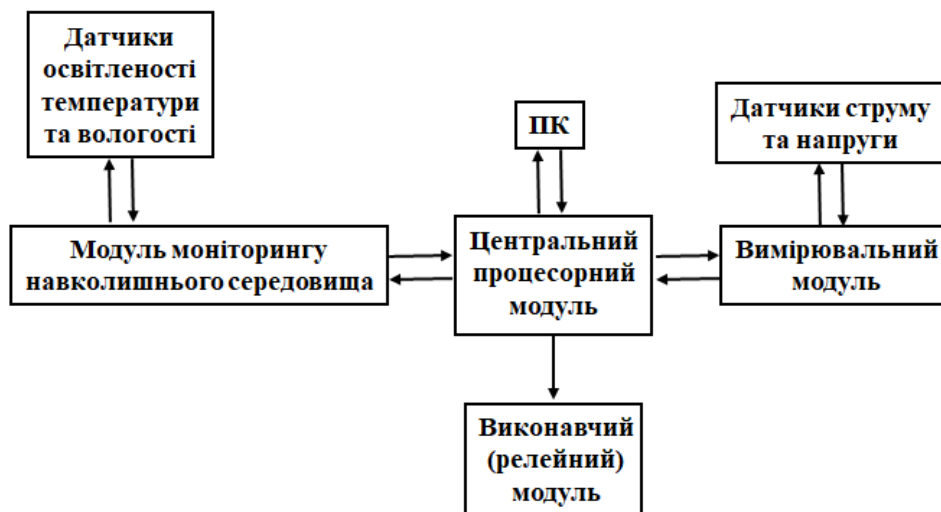
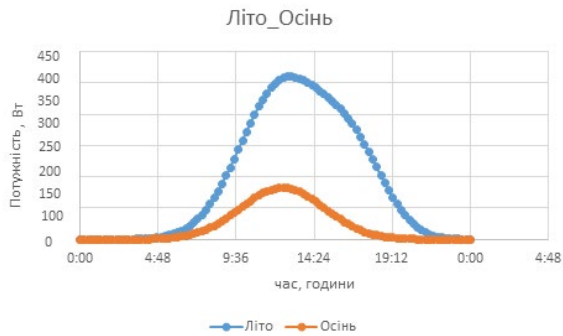


Рис.2. Структурно-функціональна схема системи моніторингу та управління

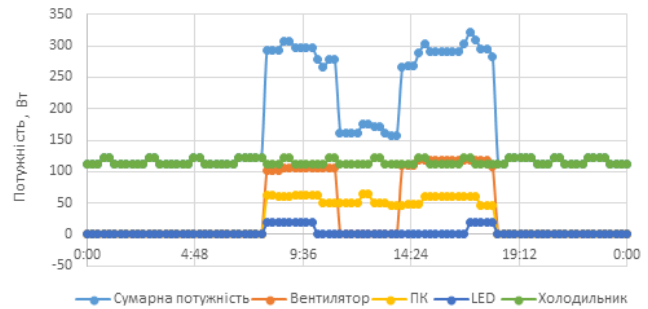
Система складається з трьох типів модулів:

- центральний процесорний модуль (контролер керування) - призначений для одержання та попередньої обробки інформації з інтерфейсних модулів;
- модуль контролю стану оточуючого середовища (складається з датчиків вологості, температури та освітленості) - призначений для одержання інформації про температуру, вологість та освітлення;
- контрольно-вимірювальний модуль (складається з датчиків струму та напруги, виконавчих пристроїв для кіл споживання та генерації) - призначений для вимірювання напруги та струму споживача/генератора і керування виконуючим механізмом.

Розроблена нами система моніторингу дозволяє сформувати денний сумарний профіль, як генерації, так і споживання електричної енергії, на прикладі локального об'єкту (Центр енергоефективності КНУТД [10]), що складається з СБ [11] та електричних пристроїв (навантажень), що включають в себе вентилятор, ПК, LED та холодильник (рис. 3).



а) профіль генерації СБ



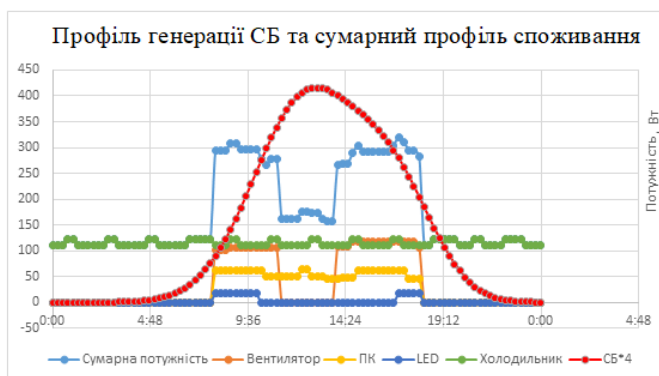
б) профілі (сумарний профіль) навантаження

Рис. 3. Денний сумарний профіль генерації та споживання електричної енергії в локальному об'єкті

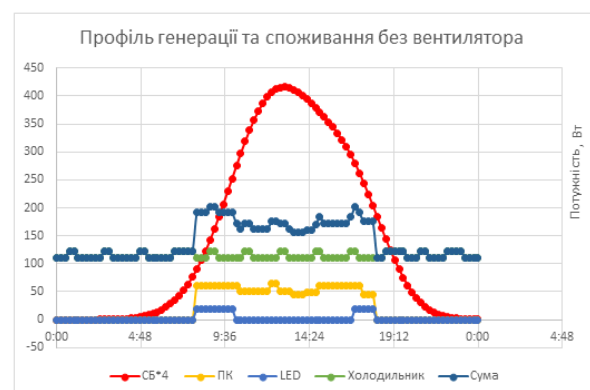
Пріоритетність підключення навантажень задається у визначеному порядку (чим менша цифра, тим вищий пріоритет):

1. Холодильник;
2. Лампи;
3. ПК;
4. Вентилятор

Максимальна ефективність електроспоживання в системі електропостачання локального об'єкту виконується при умові, коли площа, що обмежена лініями профілю споживання буде максимально знаходитися у площі кривої профілю генерації СБ. Так, накладені один на одного сумарні профілі генерації та споживання показують, що, для оптимального функціонування електричної системи локального об'єкту, потрібно підключати у визначені проміжки часу зовнішню електричну мережу (рис. 4а).



а)



б)

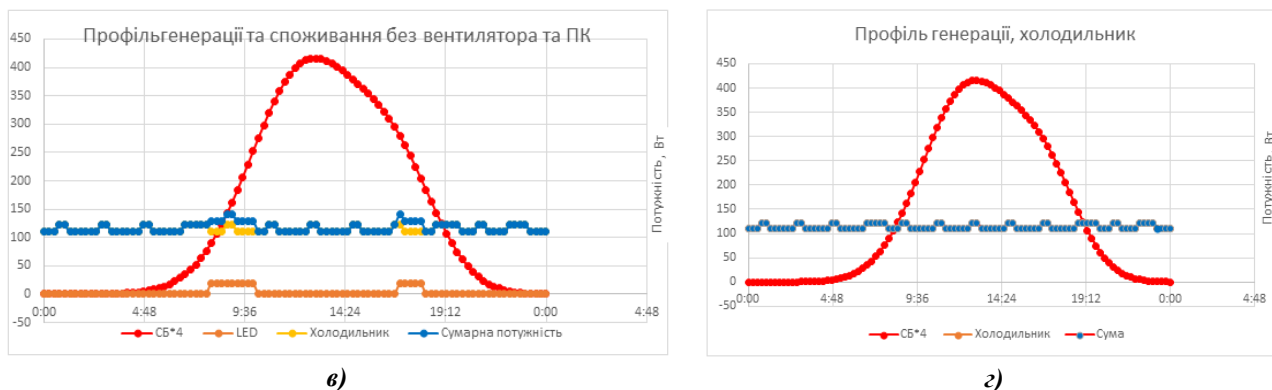


Рис. 4. Накладені профілі генерації та навантаження

Як видно з рис. 4, сумарне навантаження може бути забезпечено СБ тільки в інтервалі 10.15 до 16.45, лампи можна ввімкнути о 8.45, а в інтервалі з 8.30 до 19.00 потужності СБ вистачає лише для живлення холодильника.

Таким чином, для ефективного функціонування системи електропостачання локального об'єкту необхідно виконати наступні операції. В ЦП вводиться номінальна потужність холодильника, нижче якого він не може функціонувати. На ЦП приходить сигнал від датчика струму СБ. Коли величина потужності СБ стає рівною потужності холодильника відбувається ввімкнення в електромережу локального об'єкту. Далі в пріоритетності підключення знаходиться LED, потужність якої додається до холодильника і записується в пам'ять процесора. Коли потужність СБ досягає цієї величини, відбувається відключення LED від загальної мережі, якщо вона була підключена і підключається до СБ. В списку пріоритетності наступним приладом є ПК, потужність якого додається до потужності попереднього приладу і також записується до пам'яті процесора. Коли потужність СБ досягає цієї величини відбувається переключення від загальної мережі до СБ. В свою чергу, останній пристрій, вентилятор, підключається до СБ в той момент, коли її потужності достатньо для живлення всіх чотирьох пристроїв. У випадку падіння потужності СБ (хмарність, опади) відбувається порівняння сумарної потужності навантажень та, згідно пріоритетності, здійснюється вимкнення необхідного пристрою для досягнення безперебійного живлення локального об'єкту.

Висновки.

1. Були створені технічні засоби, що складаються з центрально-процесорного, вимірювального та виконавчого блоків для моніторингу та управління генерацією та споживанням електричної енергії в енергосистемі локального об'єкту.

2. Ці технічні засоби дозволяють формувати в режимі реального часу профілі генерації та навантаження в системі електропостачання локального об'єкту.

3. Описані засоби в неперервному режимі забезпечують оптимальне функціонування електричної системи локального об'єкту за рахунок максимального використання системою потужності, що генерується сонячною батареєю.

4. Система забезпечує збір та переробку статистичної інформації для подальшого її використання в розробці прогностичних методів функціонування електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії.

Література

1. Закон України «Про енергозбереження» №74 / 94-ВР, 1994. / Відомості Верховної Ради. - 1994. - № 30. - С.283.
2. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України : спец. вип. Ч. 1. Київ. - 2011. - С. 5-20.
3. ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
4. Каплун В. В. Аналіз методів оптимізації мікроенергетичних систем (MicroGrid) на основі джерел розподіленої генерації / В. В. Каплун, О. П. Кравченко, В. В. Василенко, С. С. Макаревич, Р. В. Каплун // Вісник КНУТД. Технічні науки. - 2015. - № 2 (84). - С. 5-17.
5. Bayindir R. Smart grid technologies and applications / R.Bayindir, I.Colak, G.Fulli, K.Demirtas// Renewable and Sustainable Energy Reviews.-2016. - V.66. - P.499-516.
6. Muhammad R.A. A Review of Smart Homes—Past, Present, and Future / Muhammad R.A., Mamun B.I., Mohd A.M.// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). - 2012. - V.42. - N6. - P.1190 - 1203.
7. Harper R. Inside the Smart Home / Harper R. // Springer-Verlag Ltd. - London. - 2003. - P.278.
8. Shavolkin O. Three-phase Grid Inverter for Combined Electric Power System with a Photovoltaic Solar Battery / O. Shavolkin, I. Shvedchykova, O. Kravchenko // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). - 2019. - Kremenchuk, Ukraine. - P.318-321.
9. Govorov P.P. Management of modes of distributive electric networks of cities under conditions of weak correlation of graphics of active and reactive power / P.P. Govorov, V.O. Novskiy, V.P. Govorov, A.K. Kindinova // Tekhnichna elektrodynamika. - 2020. - N4. - P.60-66.
10. Центр енергоефективності Київського національного університету технологій та дизайну. <https://knutd.edu.ua/university/ce/>
11. Каплун В. В. Оцінювання рівнів генерації електричної енергії сонячною

References

1. Zakon Ukrainy «Pro enerhozberezhennia» №74 / 94-VR, 1994. [Law of Ukraine "On Energy Conservation"] Vidomosti Verkhovnoi Rady - Bulletin of the Supreme Council, 30, P.283. [in Ukrainian].
2. Stohnii B.S. Intelktualni elektrychni merezhi: svitovyi dosvid i perspektvyv Ukrainy [Intelligent electrical networks: world experience and prospects of Ukraine] B. S. Stohnii, O. V. Kyrylenko, A. V. Prakhovnyk, S. P. Denysiuk. Pratsi In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy [The proceedings of the institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, 2011, N.1. P.5-20. [in Ukrainian, in English].
3. ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
4. V. V. Kaplun, O. P. Kravchenko, V. V. Vasylenko, S. S. Makarevych, R. V. Kaplun (2015). Analiz metodiv optymizatsii mikroenerhetychnykh system (MicroGrid) na osnovi dzhерel rozpodilenoї heneratsii [Analysis method for optimizing micro energy systems (microgrid) based on the distributed energy sources]. Visnik KNUTD - Bulletin of KNUTD, 2 (84), P. 5-17 [in Ukrainian].
5. R.Bayindir Smart grid technologies and applications/ R.Bayindir, I.Colak, G.Fulli, K.Demirtas // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. - V.66, P.499-516.
6. Muhammad R.A. A Review of Smart Homes—Past, Present, and Future / Muhammad R.A., Mamun B.I., Mohd A.M.// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). - 2012. - V.42. - N6. - P.1190 - 1203.
7. Harper R. Inside the Smart Home / Harper R. // Springer-Verlag Ltd. - London. - 2003. - P.278.
8. Shavolkin O. Three-phase Grid Inverter for Combined Electric Power System with a Photovoltaic Solar Battery / O. Shavolkin, I. Shvedchykova, O. Kravchenko // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). - 2019. - Kremenchuk, Ukraine. - P.318-321.
9. Govorov P.P. Management of modes of distributive electric networks of cities under conditions of weak correlation of graphics of active and reactive power. P.P. Govorov, V.O. Novskiy, V.P. Govorov, A.K. Kindinova. Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]. - 2020. - N4. - P.60-66.
10. Energy efficiency center. Kyiv National University of Technologies and Design. <https://knutd.edu.ua/university/ce/>
11. V. V. Kaplun, O. P. Kravchenko, E. H. Manoilov (2016). Otsiniuvannia rivniv heneratsii elektrychnoi

батареєю на основі статистичних даних / В. В. Каплун, О. П. Кравченко, Е. Г. Манойлов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. - 2016. - № 6 (104). - С. 26-33.

enerhii soniachnoiu batareieiu na osnovi statystychnykh danykh [Evaluation of levels electric power generation solar panels on the basis of statistical data]. Visnik KNUTD - Bulletin of KNUTD, 6 (104), P. 49-57 [in Ukrainian].

MANOILOV EDUARD

silitech@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-2798-9907>

Lashkarev's Institute of Semiconductor Physics, NANU

MALY YAROSLAV

Kyiv National University of Technologies and Design

yarikmaly2899@ukr.net

OLGA KRAVCHENKO

olgakravchenko111@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7262-0899>

Kyiv National University of Technologies & Design

HENNADII BABYCH

Kyiv National University of Technologies and Design

realbigfoot@bigmir.net

СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ОБЪЕКТА КРАВЧЕНКО О.П.¹, МАНОЙЛОВ Э.Г.², БАБИЧ Г.А.¹, МАЛЫЙ Я.С.¹

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Институт физики полупроводников им. Лашкарева В.Е., НАНУ

Цель. Создание электронной системы мониторинга и управления в системе электроснабжения локального объекта для достижения эффективного соотношения между генерацией и потреблением электрической энергии.

Методика. При исследовании использовалась теория электрических цепей и электронных схем.

Результаты. Была создана электронная система мониторинга и управления электроснабжением в энергосистеме локального объекта. Система состоит из трех модулей: центрального процессора, модуля мониторинга параметров окружающей среды и исполнительного модуля, который состоит из измерительного блока (ток, напряжение) и релейной блока. Центральный процессорный модуль обрабатывает сигналы, поступающие от мониторингового и измерительного блоков исполнительного модуля, обрабатывает их и формирует исполнительные команды на релейный блок для включения / выключения потребителей мощности или генерирующих устройств. Разработанная система позволяет, с одной стороны, осуществлять максимальный отбор мощности от распределенных (возобновляемых) источников энергии, и с другой стороны, гибкое регулирование потребления мощности в энергосистеме локального объекта для достижения эффективного соотношения между генерацией электрической энергии, которая обеспечивается распределенными источниками энергии и общей распределительной сетью, и суммарным потреблением устройствами нагрузки.

Научная новизна. Электронная система мониторинга и управления электропотреблением локального объекта позволяет в режиме реального времени осуществлять мониторинг работы компонентов генерирующей и потребляемой мощности. Система позволяет создавать энергетические профили в режиме реального времени, на базе которых формируется алгоритм управления исполнительным блоком для достижения эффективного соотношения между генерацией и потреблением электроэнергии в энергосистеме локального объекта.

Практическая значимость. В результате проделанной работы была создана электронная система мониторинга и управления электроснабжения в энергосистеме локального объекта с соответствующим формированием профилей генерации распределенных источников энергии и необходимого потребления в режиме реального времени для обеспечения эффективного энергопотребления согласно концепции распределенных электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии и Умного Дома.

Ключевые слова: распределенные источники энергии, возобновляемые источники энергии, эффективное энергопотребление, система мониторинга, локальный объект.

MEANS FOR PROVIDING OPTIMAL FUNCTIONALITY OF THE LOCAL OBJECT ELECTRICAL SYSTEM

KRAVCHENKO O. P.¹, MANOILOV E. G.², BABICH G. O.¹, MALY Y.S.¹

¹Kyiv National University of Technologies and Design

²Lashkarev's Institute of Semiconductor Physics, NANU

Purpose. Development of electronic monitoring and control system for achieving an effective ratio between electrical energy generation and consumption in the local object power supply system.

Methodology. The theory of electrical circuits and electronic circuits were used.

Obtained results. The electronic system for monitoring and controlling power supply in the local object power system was developed. The system comprises three modules: central processor, module for monitoring environment parameters and executive module which consists of measuring (current, voltage) and relay blocks. The central processor processes signals from monitoring and measuring blocks and forms executive commands on relay block in order to switch on/off consumer loads and electric generators. Developed systems allows both maximal power take-off from distributed (renewable) energy sources and flexible implementation of power consumption regulation for achieving an effective ratio between the generation of electrical energy provided by renewable energy sources and the general distribution network, and the total load device consumption in the local object power system.

Originality. The electronic monitoring and controlling system in the local object power system allows providing generated and consumed loads monitoring in the real time. The system provides an ability to form real time energy profiles based on which the control algorithm for executive block control is formed in order to achieve an effective ratio between generation and consumption of electricity in the power system of the local facility. In power consumption control system has been developed, which consists of a central processor, monitoring and executive units. The monitoring unit allows you to create energy profiles in real time, on the basis of which the control algorithm in the executive unit is formed in order to achieve an effective ratio between the electricity generation and consumption in the local object power system.

Practical value. As a result of the presented work, an electronic system for monitoring and controlling electricity supply in the local object power system with the defined formation of distributed energy sources generation and required consumption profiles in the real time was developed to provide efficient energy consumption according to the concepts of distributed electrical networks with renewable energy sources and Smart House.

Keywords: distributed energy sources, renewable energy sources, energy efficiency, monitoring system, local object.

УДК 621:542.3

БУРМІСТЕНКОВ О. П., БІЛА Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ТАРІЛЧАСТИХ ЖИВИЛЬНИКІВ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета. Створення математичних моделей, що дозволять визначити взаємозв'язок між конструктивними і технологічними параметрами тарілчастих живильників та витратами енергії, що виникають під час їх роботи.

Методика. У роботі використано класичні положення механіки, теорії контактної взаємодії твердих тіл, метод математичного моделювання.

Результати. У роботі розглянуто конструкцію та принцип дії тарілчастого живильника безперервної дії, визначено його основні конструктивні та технологічні параметри. Досліджено чинники, що створюють механічні навантаження на привод тарелі живильника. Розроблено математичні моделі для визначення моментів опору та потужності, що споживається електричним двигуном під час роботи обладнання. Запропоновані моделі дозволяють розраховувати навантаження на привод у статичному і динамічному режимах роботи та враховують конструктивні, технологічні параметри обладнання та фізико-механічні властивості сипкого матеріалу. Представлено результати дослідження впливу коефіцієнтів тертя, положення ножа та сили його притискання до поверхні тарелі, швидкості обертання тарелі на навантаження, що діють на електропривод. Встановлено, що розрахунок приводу доцільно виконувати для режиму, за якого відстань між кромкою ножа та віссю обертання тарелі є максимальною, що відповідає роботі при максимальному навантаженні. Визначено, що зміна технологічних параметрів живильника (швидкості обертання тарелі, положення ножа) може призводити до зміни навантаження на електропривод на 86%, що необхідно враховувати при виборі двигуна.

Наукова новизна. Розроблено математичні моделі роботи тарілчастого живильника безперервної дії для визначення взаємозв'язку між конструктивними і технологічними параметрами тарілчастих живильників та витратами енергії.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють за відомими конструктивними, технологічними параметрами та фізико-механічними властивостями сипкого матеріалу визначити навантаження на привод тарелі.

Ключові слова: живильник, сипкий матеріал, електропривод, механічні навантаження, процес дозування.

Вступ. Дозування сипких матеріалів широко використовується у технологічних процесах виготовлення виробів з полімерних матеріалів [1, 2, 10]. Забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей досягається за рахунок створення сумішей гранул полімерних матеріалів, барвників та різноманітних домішок відповідно до заданої рецептури. Точність процесів дозування визначає відсотковий склад суміші, а отже безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту. Проблема ускладнюється при використанні змішувального обладнання безперервної дії. В цьому випадку компоненти суміші рухаються безперервними потоками, що підвищує вимоги до точності дозування. Це зумовлює необхідність створення спеціалізованих живильників безперервної дії. Однією з таких конструкцій є живильники тарілчастого типу. Їх конструкція забезпечує мінімальний механічний вплив на частинки матеріалу та можливість керування продуктивністю у широкому діапазоні. Водночас, особливості роботи таких живильників зумовлюють появу змінних навантажень на привод, які мають бути враховані при проектуванні обладнання

даного типу [7]. Таким чином, дослідження спрямовані на визначення енергетичних параметрів тарілчастих живильників безперервної дії є актуальними.

Постановка завдання. Завданням дослідження є визначення чинників, що створюють навантаження на електропривод тарілчастого живильника, та розроблення математичних моделей, які дозволять прогнозувати величину моменту опору на основі відомих конструктивних та технологічних параметрів.

Результати та їх обговорення. Схема тарілчастого живильника показана на рис. 1. Частинки сипкого матеріалу під дією сили тяжіння надходять з бункера (1) через вихідний патрубок на поверхню тарелі (4). Для забезпечення коректної роботи живильника необхідно використовувати бункери із круглими випускними отворами, центр яких співпадає з віссю обертання тарелі. Сипкий матеріал на поверхні тарелі розташовується у вигляді усеченого конусу. Кут нахилу поверхні конусу визначається кутом природнього укосу матеріалу, а його висоту можна регулювати за допомогою манжети (3).

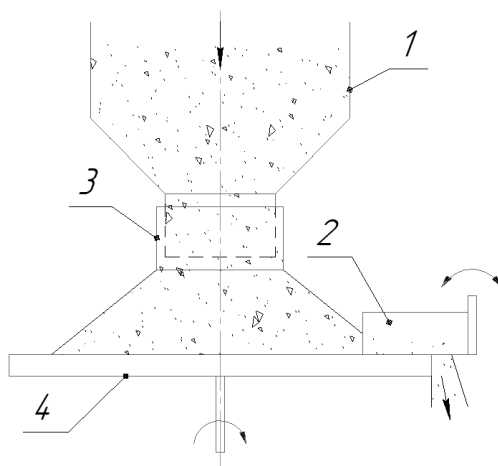


Рис. 1. Схема конструкції тарілчастого живильника

У процесі роботи таріль обертається з заданою швидкістю, ніж (2) займає задане положення та знімає певний об'єм сипкого матеріалу. До переваг тарілчастих живильників можна віднести широкий діапазон керування продуктивністю, високу точність дозування, низькі масо-габаритні показники.

Керувати об'ємною продуктивністю тарілчастого живильника можна трьома способами:

- 1) за рахунок зміни швидкості обертання тарелі;
- 2) за рахунок зміни положення манжети;
- 3) за рахунок керування положення ножа.

Перші два варіанти технічно складніше реалізувати ніж керування за рахунок зміни положення ножа.

Продуктивність живильника можна обчислити за виразом [8]:

$$Q = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} \varphi (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H) \left[\left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right)^2 + \left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right) R_H + R_H^2 \right] \\ - \varphi R_H^2 (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H) \end{array} \right] \omega \rho, \quad (1)$$

де ρ – насипна густина матеріалу, кг/м^3 ; R_B – радіус вихідного патрубку бункера, м; R_H – відстань від кромки ножа до вісі обертання тарелі, м; ω – частота обертання тарелі, рад/с ; L – відстань від поверхні тарелі до вихідного патрубку, м; φ – кут природнього укусу, рад.

Під час роботи живильника внаслідок дії різних чинників можуть змінюватись положення ножа та швидкість обертання тарелі:

$$Q = f(R_H, \omega). \quad (2)$$

Обидва параметри є функціями часу, що дозволяє записати формулу для визначення продуктивності у наступному вигляді:

$$Q = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} \varphi (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H(t)) \left[\left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right)^2 + \left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right) R_H(t) + R_H^2(t) \right] - \\ - \varphi R_H^2 (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H(t)) \end{array} \right] \omega(t) \rho. \quad (3)$$

Тривалість перебування матеріалу всередині залежить від його конструктивних та технологічних параметрів і чисельно визначається постійною часу T . У випадку керування продуктивністю за рахунок зміни положення ножа, величина T обумовлена параметрами сервоприводу. Час переміщення ножа між заданими положеннями визначає тривалість перехідного процесу. Таким чином, отримуємо диференціальне рівняння:

$$\frac{dQ_{\text{вих}}}{dt} = \frac{1}{T} \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} \varphi (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H(t)) \times \\ \times \left[\left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right)^2 + \left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right) R_H(t) + R_H^2(t) \right] - \\ - \varphi R_H^2 (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H(t)) \end{array} \right] \omega(t) \rho - Q_{\text{вих}}. \quad (4)$$

Його чисельний розв'язок потребує визначення початкових та граничних умов.

Приймаємо наступні початкові умови:

- в момент пуску живильника $Q_{\text{вих}} = 0$;
- в усталеному режимі роботи $Q_{\text{вих}} = Q_{\text{уст}}$, де $Q_{\text{уст}}$ – продуктивність в усталеному режимі роботи.

Граничні умови визначаємо з наступних міркувань.

- 1) Для коректної роботи живильника необхідно забезпечити швидкість обертання тарелі меншою за швидкість, що зумовлює рух частинок внаслідок дії відцентрових сил:

$$\omega = \sqrt{\frac{gf}{R}},$$

де f – коефіцієнт тертя частинок по поверхні тарелі; R – радіус тарелі; g – прискорення вільного падіння.

- 2) Відстань від осі обертання до ножа має бути більшою ніж радіус вихідного патрубку бункера: $R_H > R_B$.

- 3) Розмір вихідного патрубку має бути більшим ніж розмір частинки: $R_B > (3..6)r$, де r – радіус частинки.

У процесі роботи між кромкою ножа та поверхнею тарелі виникають сили тертя, що зумовлені кількістю мікрочастинок сипкого матеріалу у зазорі між тарелю та ножом. Внаслідок цього змінюються моменти опору, які діють на приводи тарелі та ножа, що, у свою чергу, зумовлює тимчасову зміну їх положення. Тобто, швидкість обертання тарелі та положення ножа є випадковими величинами, які можна описати за допомогою нормального розподілу [9] з математичним очікуванням R_H , ω та дисперсіями σ_R , σ_ω , відповідно. В результаті рівняння (4) прийме вигляд:

$$\frac{dQ_{вих}(t)}{dt} = \frac{1}{T} \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3} \varphi(L + R_B \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{rand}(R_H(t), \sigma_R)) \times \\ \times \left[\left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right)^2 + \left(\frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right) \operatorname{rand}(R_H(t), \sigma_R) + \right. \\ \left. + \operatorname{rand}(R_H(t), \sigma_R)^2 \right] - \times \\ - \varphi R_H^2 (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{rand}(R_H(t), \sigma_R)) \\ \times \operatorname{rand}(\omega(t), \sigma_\omega) \rho - Q_{вих}(t) \end{array} \right], \quad (5)$$

де σ_ω – середньоквадратичне відхилення швидкості від заданого значення; $\omega_{зад}$ – задане значення швидкості обертання тарелі; σ_R – середньоквадратичне відхилення положення ножа від заданого значення; R_H – задане положення ножа.

Результати моделювання роботи системи показані на рис. 2.

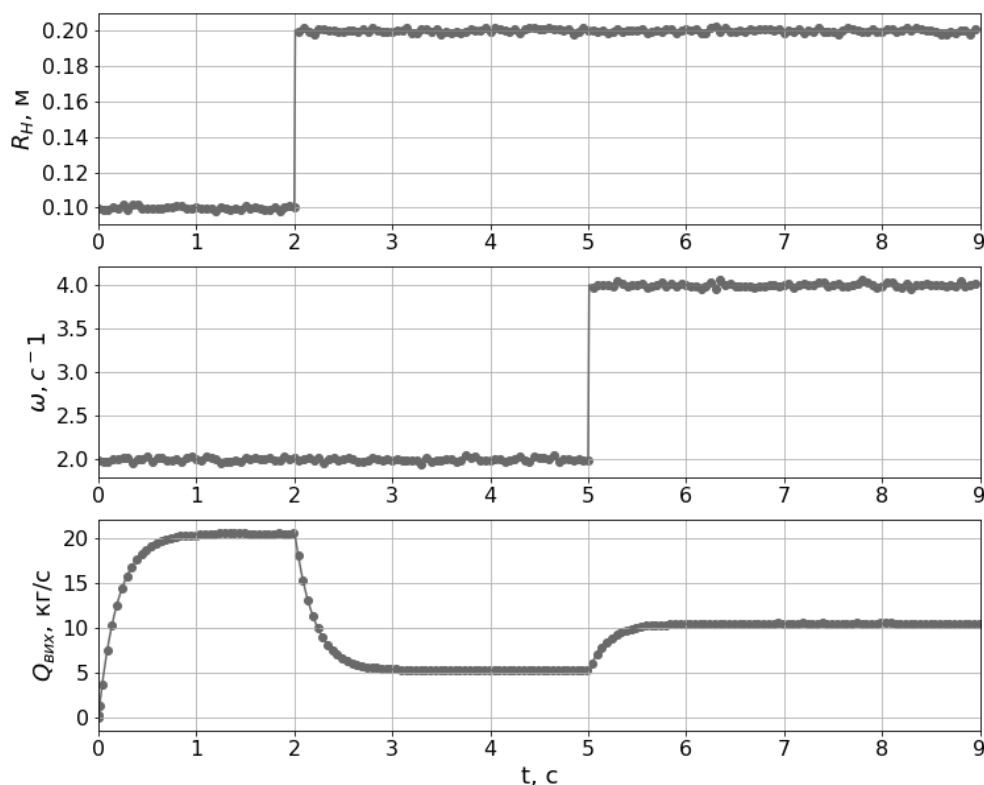


Рис. 2. Залежність продуктивності живильника від швидкості обертання тарелі та положення ножа

У період часу від 0 до 2 с відбувається пуск живильника. Задані значення для цього періоду: $L = 0,1$ м, $R_B = 0,1$, $\varphi = 30$ град, $T = 0,2$. У момент часу $t = 2$ с змінюється значення положення ножа з $R_H = 0,1$ м до $R_H = 0,2$ м, а у момент $t = 5$ с швидкість обертання тарелі зростає з $\omega = 2$ рад/с до $\omega = 4$ рад/с. Внаслідок цього відбувається зменшення продуктивності на інтервалі часу $t = (2..5)$ с, та збільшення продуктивності у період $t = (5..10)$ с (рис. 2). За отриманими залежностями визначено діапазон швидкостей обертання тарелі в усталеному режимі роботи, для якого проведено розрахунки навантажень на привод.

Визначення можливих діапазонів навантажень на привод тарелі потребує дослідження взаємодії ножа з поверхнею тарелі та впливу на нього сипкого матеріалу. Розрахункова схема для визначення продуктивності живильника показана на рис. 3.

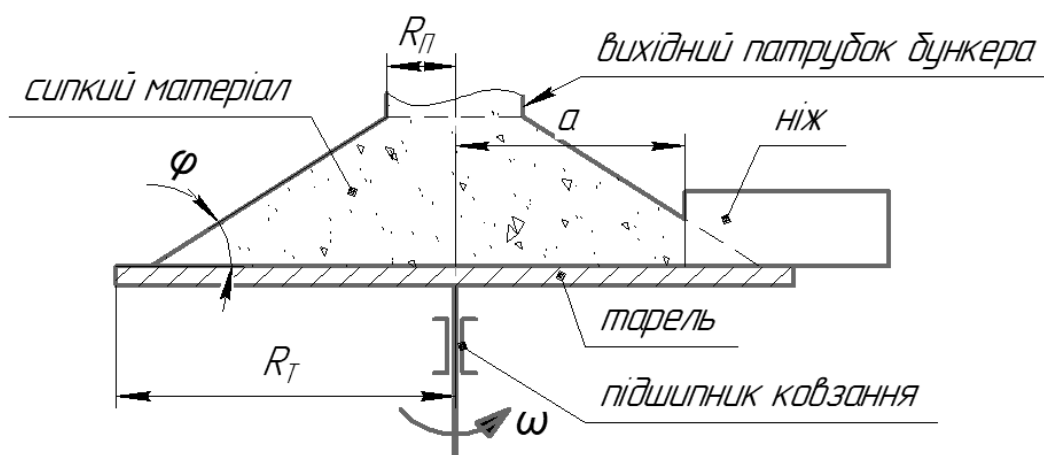


Рис. 3. Схема визначення продуктивності тарілкового живильника

Величина сил опору [3, 4, 5] складається з:

- сил тертя ковзання між ножом та тареллю;
- сил тертя ковзання у підшипниках тарелі;
- інерційних сил, що визначаються масою тарелі та сипкого матеріалу.

Момент інерції тарелі та сипкого матеріалу, зведений до валу привода, визначається за формулою:

$$J = J_T + J_M, \quad (6)$$

де J_T, J_M – моменти інерції тарелі та сипкого матеріалу, відповідно.

Момент інерції тарелі живильника, яка має форму круглого диску постійної товщини, дорівнює:

$$J_T = \frac{1}{2} \cdot m_T \cdot R_T^2, \quad (7)$$

де m_T – маса тарелі, кг; R_T – радіус тарелі, м.

Розташування сипкого матеріалу на поверхні тарелі має форму усіченого конуса. Його верхній радіус дорівнює радіусу вихідного патрубку бункера, а нижній визначається відстанню між патрубком бункера і поверхнею тарелі та кутом природнього укусу матеріалу. Відповідно, момент інерції сипкого матеріалу визначається за формулою:

$$\begin{aligned}
 J_M &= \frac{1}{2} \int_0^H \rho_M S_M R(z)_M^2 dz = \frac{1}{2} \int_0^H \rho_M \frac{\pi \cdot R_M^2}{2} R_M^2(z) dz = \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^H \rho_M \frac{\pi \left(R_{II} + \frac{z}{\operatorname{tg} \varphi} \right)^2}{2} \left(R_{II} + \frac{z}{\operatorname{tg} \varphi} \right)^2 dz = \frac{1}{4} \pi \rho_M \int_0^H \left(R_{II} + \frac{z}{\operatorname{tg} \varphi} \right)^4 dz,
 \end{aligned} \quad (8)$$

де R_{II} – радіус вихідного патрубку, м; ρ_M – насипна густина матеріалу, кг/м^3 ; H – відстань від вихідного патрубку до поверхні тарелі, м; z – координата вздовж осі обертання.

Величина сили тертя ковзання між поверхнею тарелі та ножом залежить від сили притискання ножа до тарелі $F_{ПН}$ та коефіцієнта тертя k_H :

$$F_H = k_H F_{ПН}. \quad (9)$$

У підшипниках ковзання, які використовують у тарілчастих живильниках, сила тертя наближено розраховується за формулою:

$$F_{II} = k_{II} \sqrt{F_r^2 + F_a^2} \frac{d}{2}, \quad (10)$$

де d – діаметр валу, м; F_r , F_a – радіальна та осьова складові навантаження, що діють на підшипник, Н; k_{II} – коефіцієнт тертя ковзання підшипника.

З врахуванням (10) момент опору підшипника визначається наступним співвідношенням:

$$M_{II} = F_{II} \cdot \frac{d}{2} = k_{II} \sqrt{F_r^2 + F_a^2} \frac{d^2}{4}. \quad (11)$$

Під час роботи, привод живильника може знаходитись під дією статичних та динамічних навантажень [6]. Статичний режим відповідає обертанню тарелі з постійною швидкістю. Динамічний режимі виникає при зміні швидкості обертання тарелі. Зазвичай найбільшу величину такі навантаження мають під час пуску живильника, що відповідає зміні швидкості обертання тарелі від нуля до заданого значення. Сумарний момент сил опору матиме наступний вигляд:

$$M_{\Sigma} = M_{ст} + M_{дин} = M_{II} + M_H + (J_T + J_M) \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

де $M_{ст}$, $M_{дин}$ – статична та динамічна складові моментів опору, відповідно.

Водночас, слід враховувати, що момент опору ножа M_H є змінною величиною, яка залежить від відстані від кромки ножа до центру тарелі a (рис. 4):

$$M_H = F_H \left(a + \frac{R_T - a}{2} \right) = F_H \frac{a + R_T}{2}, \quad (13)$$

де a – відстань від кромки ножа до центру тарелі, м.

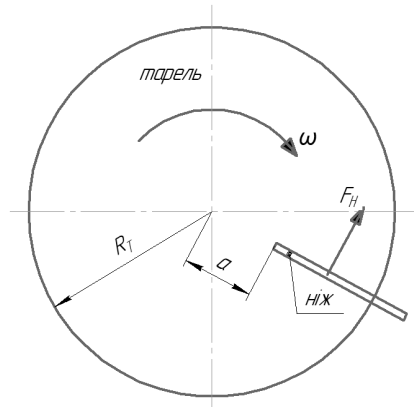


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення сил тертя між ножом та поверхнею тарелі

Мінімальну потужність, що має розвивати електричний двигун, можна розрахувати за формулою:

$$P = M_{\Sigma} \cdot \omega. \quad (14)$$

Також необхідно враховувати, що на практиці ніж не може бути ідеально дотичним до поверхні тарелі. Між ними завжди існує зазор, у який можуть потрапляти мікрочастинки матеріалу, що призводитиме до зміни коефіцієнту тертя ножа о поверхню тарелі та до відповідної зміни сил опору. Діапазон зміни цих коефіцієнтів може бути суттєвим, оскільки коефіцієнт тертя ковзання сталі по сталі, з якої виготовлені ніж та таріель, знаходиться у межах від 0,1 до 0,12, а коефіцієнт тертя між полімером та сталлю може дорівнювати від 0,15 до 0,4 в залежності від типу полімеру.

У статичному режимі роботи швидкість обертання тарелі є константою, відповідно, динамічна складова дорівнює нулю, а величина моменту опору лінійно залежить від параметрів a , k_H та $F_{ПН}$. Результати розрахунків величини моменту опору на валу приводу у такому режимі показані на рис. 5-7. При проведенні розрахунків були прийняті наступні параметри живильника: $R_T = 0,3$ м; $R_{П} = 0,05$ м; $H = 0,1$ м; $d = 0,01$ м; $F_r = 2$ Н; $F_a = 30$ Н; $\rho = 800$ кг/м³; $\varphi = 30^\circ$.

Дослідження динамічних навантажень здійснювалось для режиму пуску. При цьому було прийнято, що таріель змішувача змінює швидкість обертання від 0 до заданої ($\omega_{зад}$) за $T = 2$ с. На рис. 8 показані отримані залежності мінімальної потужності, яку має розвивати електропривод, від заданої швидкості обертання для різних положень ножа.

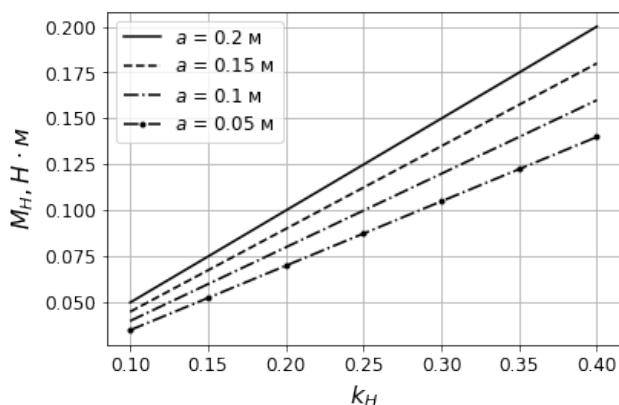


Рис. 5. Залежність величини моменту опору на валу приводу від коефіцієнту тертя для різних положень ножа

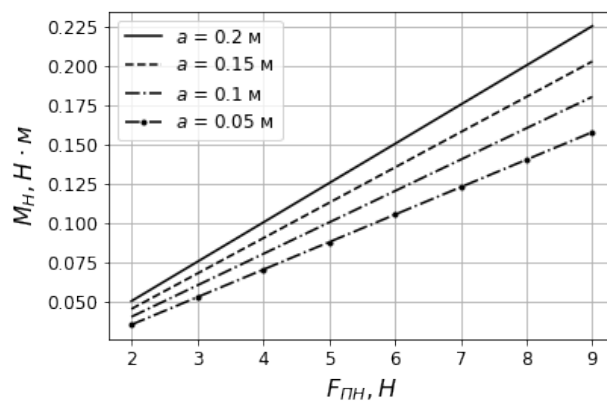


Рис. 6. Залежність величини моменту опору на валу приводу від сили притискування ножа та його положення

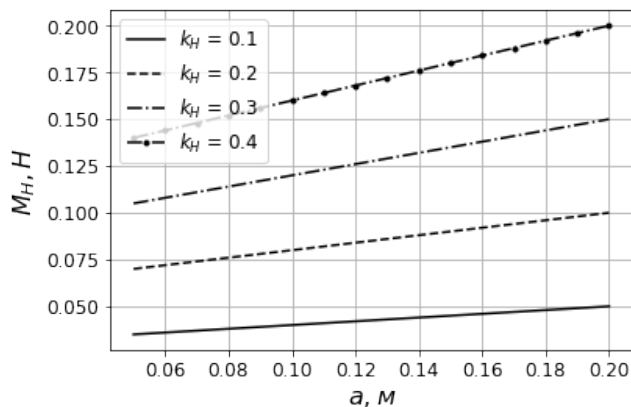


Рис. 7. Залежність величини моменту опору на валу приводу від положення ножа та коефіцієнтів тертя

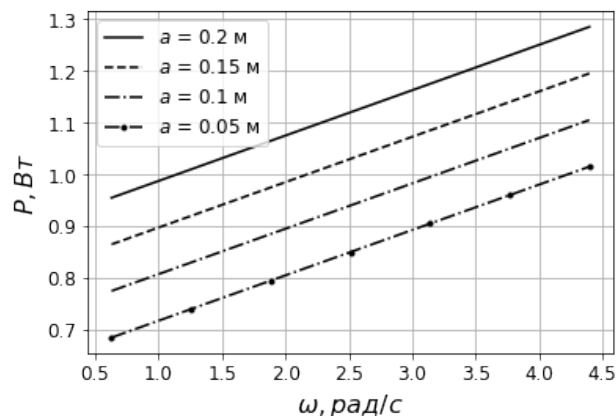


Рис. 8. Залежність мінімальної потужності приводу, що забезпечує необхідну швидкість обертання тарелі, за різних положень ножа

Висновки:

1) Запропоновані математичні моделі дозволяють розрахувати величини механічних навантажень та потужність приводу для заданих режимів роботи тарілчастого живильника та фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу.

2) Розрахунок приводу доцільно виконувати для режиму, за якого відстань між кромкою ножа та віссю обертання тарелі є максимальною, що відповідає роботі при максимальному навантаженні.

3) Зміна технологічних параметрів живильника (швидкості обертання тарелі, положення ножа) може призводити до зміни навантаження на електропривод до 86%, що необхідно враховувати при виборі двигуна.

Література

1. Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ: КНУТД, 2017. – 220с.
2. Бурмістенков О. П. Процеси та обладнання підготовчих виробництв легкої промисловості / О. П. Бурмістенков, О. А. Стародуб, В. П. Місяць, Т. Я. Біла, В. В. Стаценко. - К. : КНУТД, 2011. – 137 с.
3. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения, М: Физматлит, 2012. – 348с.
4. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No3. P.260–264.
5. Paula Macías Vera. Report 12: Flow of salt particles on a spinning spreader disk. External Influences on Spray Patterns. / Paula

References

- 1.Statsenko V. V., Burmistenkov O. P., Bila T. Y. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperernvnoho pryhotuvannya kompozycij sypkux materialiv: monohrafiya [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design [in Ukrainian].
- 2.Burmistenkov O. P., Starodub O. A., Misiats V. P., Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2011). Protsesty ta obladnannia pidhotovchykh vyrobnystv lehkoji promyslovosti [Processes and equipment of light industry preparatory industries] – Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design, 137 p. [in Ukrainian]
- 3.Popov V. L. (2012) Mekhanyka kontaktneho vzaymodeistyvyia y fyzyka trenyia [Contact mechanics interaction and physics of friction] – Moscow: Fyzmatlyt. 348p. [in Russian]
- 4.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. No3. 260–264. [in English]
- 5.Paula Macías Vera, Torben Brøchner, Jan S. Strøm, Hisamitsu Takai. (2014) Report 12: Flow of salt particles

Macías Vera, Torben Brøchner, Jan S. Strøm, Hisamitsu Takai. // EPAS. – 2014.

6. Біла Т. Я. Моделювання динамічних навантажень в змішувальних комплексах безперервної дії. / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – №4. С.24-29.

7. Бурмістенков О. П. Основні напрямки автоматизації змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів. / О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 6. С.28-31.

8. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Дослідження роботи системи керування продуктивністю тарілчастого живильника безперервної дії. VIII Українсько-Польські наукові діалоги: матеріали міжнар. конф., 16-19 жовтня 2019 р. Хмельницький – Кам'янець-Подільський.

9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: «Высшая школа». – 1998. – 576с.

10. Гаврилова О. Е., Никитина Л. Л., Канаева Н. С., Геркина О. Ю. Обзор современных полимерных материалов, применяемых в производствах легкой промышленности. Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – С.276-278.

on a spinning spreader disk. External Influences on Spray Patterns. – EPAS. [in English]

6. Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2015) Modeliuvannia dynamichnykh navantazhen v zmishuvalnykh kompleksakh bezpererвної dii. [Dynamic loads modeling in continuous mixing complexes] Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. №4. 24-29. [in Ukrainian]

7. Burmistenkov O. P., Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2017) Osnovni napriamky avtomatyzatsii zmishuvalnykh kompleksiv bezpererвної dii dlia sypkykh materialiv. [The main directions of continuous mixing complexes automation for bulk materials.] Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. № 6. 28-31. [in Ukrainian]

8. Burmistenkov O. P., Statsenko V. V. (2019) Doslidzhennia roboty systemy keruvannia produktyvnistiu tarilchastoho zhyvylnyka bezpererвної dii. [Research of control system work of a continuous action plate feeder productivity] VIII Ukrainsko-Polski naukovi dialohy: materialy mizhnar. konf., 16-19 zhovtnia 2019. Khmelnytskyi – Kam'ianets-Podilskyi. [in Ukrainian]

9. Venttsel E. S. (1998) Teoryia veroiatnostei. [Probability theory] M.: «Vysshiaia shkola». 576s. [in Russian]

10. Havrylova O. E., Nykityna L. L., Kanaeva N. S., Herykna O. Yu. (2015) Obzor sovremennykh polymernykh materyalov, pryeniaemykh v proyzvodstvakh lehkoy promyshlennosti. [Review of modern polymeric materials used in light industry] Vestnyk Kazanskoho tekhnolohycheskoho unyversyteta. – P.276-278. [in Russian]

STATSENKO V. V.
statsenko.v@knutd.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>
Researcher ID: C-3646-2017
Kiev National University of Technologies & Design

BURMISTENKOV O. P.
burmistenkov.op@knutd.edu.ua ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>
Researcher ID: T-5180-2018
Kiev National University of Technologies & Design

BILA T. Y.
bila.ty@knutd.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>
Researcher ID: T-5276-2018
Kiev National University of Technologies & Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ПИТАТЕЛЕЙ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Создание математических моделей, позволяющих определить взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами тарельчатых питателей и возникающими во время их работы затратами энергии.

Методика. В работе использованы классические положения механики, теории контактного взаимодействия твердых тел, метод математического моделирования.

Результаты. В работе рассмотрены конструкция и принцип действия тарельчатого питателя непрерывного действия, определены его основные конструктивные и технологические параметры. Исследованы факторы, создающие механические нагрузки на привод тарели питателя. Разработаны математические модели, позволяющие определить моменты сопротивления и потребляемую электрическим двигателем мощность во время работы оборудования. Предложенные модели позволяют определять нагрузку на привод в статическом и динамическом режимах работы и учитывают конструктивные, технологические параметры оборудования и физико-механические свойства сыпучего материала. Представлены результаты исследования влияния коэффициентов трения, положение ножа и силы его прижатия к поверхности тарели, скорости вращения тарели на нагрузки, действующие на электропривод. Установлено, что расчет привода целесообразно выполнять для режима, при котором расстояние между кромкой ножа и осью вращения тарели является максимальным, что соответствует работе при максимальной нагрузке. Определено, что изменение технологических параметров питателя (скорости вращения тарели, положение ножа) может приводить к изменению нагрузки на электропривод на 86%, что необходимо учитывать при выборе двигателя.

Научная новизна. Разработаны математические модели работы тарельчатого питателя непрерывного действия, позволяющие определить взаимосвязь между конструктивными и технологическими параметрами тарельчатых питателей и затратами энергии.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют по известным конструктивным, технологическим параметрам и физико-механическими свойствами сыпучего материала определить нагрузку на привод тарели.

Ключевые слова: питатель, сыпучий материал, электропривод, механические нагрузки, процесс дозирования.

RESEARCH OF PLATE FEEDERS ENERGY CONSUMPTION FOR BULK MATERIALS BURMISTENKOV O. P., BILA T. Y., STATSENKO V. V.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Creation of mathematical models that allow determining the relationship between the design and technological parameters of the plate feeders and the energy consumption arising during their operation.

Methodology. The work uses the classical mechanics principles, the contact interaction of solids theory and the mathematical modeling method.

Findings. The paper considers the design and operation principle of a continuous plate feeder, defines its main design and technological parameters. The factors that create mechanical loads on the drive of the feeder plate are investigated. Mathematical models have been developed that make it possible to determine the moments of resistance and the power consumed by an electric motor during the equipment operation. The proposed models make it possible to determine the load on the drive in static and dynamic operation modes and take into account the design, technological parameters of the equipment and the bulk material physical and mechanical properties. The study results of the friction coefficients influence, the knife position and the force of its pressing on the plate surface, the plate rotation speed on the loads acting on the electric drive are presented. It has been found that the drive calculation is expedient for the mode in which the distance between the knife edge and the rotation axis of the plate is maximum, which corresponds to the operation at maximum load. It has been determined that a change in the feeder technological parameters (plate rotation speed, knife position) can lead to a change in the load on the electric drive by 86%, which must be taken into account when choosing a drive.

Originality. Mathematical models of the continuous plate feeder operation have been developed, which make it possible to determine the relationship between the design and technological parameters of the plate feeders and energy consumption.

Practical value. The results obtained make it possible to determine the load on the plate drive by the known design, technological parameters and bulk material physical and mechanical properties.

Keywords: feeder, bulk material, electric drive, mechanical loads, dosing process.

УДК 620.91:697.1

ШЕВЧЕНКО О.М., ШОВКАЛЮК М.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**РОЗРОБКА ІНВЕСТИЦІЙНИХ ПРОЄКТІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТУДМІСТЕЧКА КПІ ТА
ІНТЕГРАЦІЯ У ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС**

Мета. Розробка і аналіз основних показників інвестиційного проекту термомодернізації будівель студентського кампуса КПІ та управління енергоспоживанням за рахунок віддаленого моніторингу з інтеграцією в освітній процес.

Методика. Виконано техніко-економічний аналіз з використанням інженерних методик розрахунку, експериментальні вимірювання із застосуванням лабораторного обладнання. Застосовуються загальнонаукові методи аналізу та синтезу, специфічні методи (групування, порівняння, узагальнення), статистична обробка даних, моделювання у спеціалізованих програмних продуктах.

Результат. Зменшення загального споживання енергетичних ресурсів, а також грошових витрат на їх оплату; створення умов та інструментальної бази для науково-дослідницьких робіт; підвищення якості надання освітніх послуг, залучення студентів до виконання енергетичних обстежень; розробка програмного забезпечення та створення системи автоматизованого моніторингу енергоспоживання.

Наукова новизна. Розвинуто комплексний підхід до розробки інвестиційних проєктів підвищення енергоефективності студмістечок з урахуванням технічних, економічних та екологічних показників з поглибленим інженерним аналізом характеристик будівель та їх інженерних систем. Запропоновано нові підходи до розробки автоматизованого робочого місця енергоменеджера з структурними елементами програмного забезпечення системи енергомоніторингу.

Практична значимість. Розроблено інвестиційний проєкт комплексної термомодернізації будівель студентського кампуса та модернізації інженерних мереж окремих будівель з вибором обладнання та розробкою схем розміщення. Визначено основні техніко-економічні та екологічні показники проєкту. Важливий освітній напрямок - залучення студентів до процесу розробки інвестиційних проєктів з використанням сучасних технологій на прикладі об'єктів студмістечка, що дозволить створити середовище для комфортних умов навчання та виконання досліджень.

Реалізація інвестиційного проєкту дозволить на основі існуючого старого фонду будівель створити сучасний енергоефективний майданчик з використанням інноваційних рішень.

Ключові слова. енергоспоживання, кампус, енергетична ефективність, будівлі, термомодернізація.

Вступ. Україна взяла на себе зобов'язання щодо імплементації вимог ЄС [1] у сфері енергоефективності. Заклади освіти в Україні являються утримувачами матеріальної бази і в умовах економії бюджетних коштів повинні самостійно вирішувати питання ефективного управління енергоспоживанням. Крім того, вищі заклади освіти можуть виступати в якості "майданчика" для інтеграції у навчальний процес сучасних підходів управління енергоспоживанням у студмістечках та вибору енергозберігаючих технологій. Кампус КПІ ім. Ігоря Сікорського на території в 160 гектарів налічує близько 50 будівель різного призначення з власними інженерними мережами і для управління процесами енергоспоживання університету створено систему енергоменеджменту [2], що передбачає також стимулювання та інформування персоналу [3,4]. Використання наукового потенціалу університету із залученням студентів до виконання енергообстежень та науково-дослідницьких робіт на базі

об'єктів КПІ [5-7] дозволяє підвищити якість освітніх послуг. Для отримання фінансування заходів з підвищення енергоефективності кампусу Служба енергоменеджменту університету із залученням фахівців відповідних кафедр розробляє інвестиційні проекти. Технічні рішення, що закладаються при цьому, повинні відповідати сучасним нормативним вимогам до будівель [8,9] та систем автоматизації [10].

Постановка завдання. Завдання дослідження: поглиблення існуючих підходів до управління енергоспоживанням у студмістечках та розробці інвестиційних проектів термомодернізації та енергомоніторингу із залученням наукового потенціалу закладу.

Система енергоменеджменту та базовий рівень енергоспоживання КПІ ім. І. Сікорського є одним з найбільших навчальних закладів Європи: у ньому навчається майже 25 тисяч студентів, аспірантів і докторантів. В закладі передбачено дворівневу систему управління процесами енергоспоживання (рівень університету та локальний рівень) [2], а Служба енергоменеджменту (СЕМ), яку створено у 2004 році, виконує різні завдання: розрахунково-аналітичні, організаційні, просвітницькі.

Для оцінювання ефективності реалізації заходів з підвищення енергоефективності на об'єктах університету перед їх впровадженням потрібно визначити базовий рівень енергоспоживання. Для цього проведено порівняння фактичних, фактичних приведених до нормативних погодних умов [11] та розрахункових витрат енергоносіїв для потреб опалення. В результаті детального аналізу встановлено, що відхилення фактичних приведених витрат для потреб опалення будівель від нормативних витрат енергії для потреб опалення для існуючих та проєктованих/модернізованих будівель складає в середньому 18% (причому вимоги до мікроклімату в приміщеннях не витримуються), таким чином, можна говорити про некоректність використання фактичних даних для встановлення базового рівня теплоспоживання для потреб опалення. Тому, для цілей визначення економії від пропонованих заходів з підвищення енергоефективності, базовий рівень теплоспоживання для потреб опалення будівель під час енергетичних аудитів визначено розрахунковим способом.

Інвестиційний проєкт «Комплексна термомодернізація будівель». Для залучення інвестицій проведено якісне енергетичне обстеження, для цього були залучені студенти ІЕЕ, які на прикладі об'єктів КПІ виконували курсові проєкти з дисципліни «Енергоаудит». Під керівництвом викладачів та у співпраці із СЕМ були зібрані вихідні дані, уточнені геометричні та теплотехнічні характеристики огорожень, схеми інженерних мереж, побудовані енергобаланси, розраховано фактичне та приведені до нормативних умов питоме теплоспоживання, виконано інструментальні вимірювання та тепловізійну зйомку, створено температурні карти та запропоновано економічно обґрунтовані заходи з енергозбереження.

Проєкт включає дві основні частини:

- термомодернізація будівель (утеплення фасадів мінеральними плитами 15 см та оздоблення декоративною штукатуркою; утеплення горищ мінераловатними плитами, заміна вікон) з доведенням опору теплопередачі до нормативних вимог (див. табл.1);
- заходи з підвищення енергоефективності інженерних систем окремих будівель.

Таблиця 1

Характеристики будівель для базового та проєктного сценаріїв

Найменування будівлі	Рік побудови будівлі	Опір теплопередачі елементів будівлі, м ² ·К/Вт, за:					
		базовим сценарієм			проєктним сценарієм		
		стіни	вікна	перекриття	стіни	вікна	перекриття
Корпус №5	1974	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №8	1927	1	0,4	1	4,86	0,4	4,95
Корпус №11	1963	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №12	1961	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №13	1966	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №14	1965	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №15	1965	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №16	1965	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №17	1969	0,7	0,4	1	4,56	0,4	4,95
Корпус №18	1976	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №19	1977	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №22	1974	0,7	0,38	1,374	4,56	0,75	4,95
Корпус №23	1977	0,7	0,38	0,9	4,56	0,75	4,95
Корпус №24	1983	0,8	0,38	1	4,66	0,75	4,95
Гуртожиток № 6	1961	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 7	1963	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 12	1968	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 13	1969	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 14	1970	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 15	1971	0,80	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 16	1973	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95
Гуртожиток № 17	1975	0,8	0,38	1,07	4,665	0,75	4,95

При розрахунку споживання теплової енергії за базовим і проєктним сценарієм бралися до уваги діючі нормативи внутрішньої і зовнішньої температури; робочі години тижня визначалися у відповідності до показників функціонування будівлі за життєвий цикл. Результати розрахунку споживання теплової енергії наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку споживання теплової енергії до та після термомодернізації

Найменування будівлі	Річне споживання теплової енергії за:	
	базовим сценарієм	проєктним сценарієм
	ГДж	ГДж
Корпус №5	9818,9	3171,2
Корпус №8	1857,6	602,3
Корпус №11	6253,8	1585,9
Корпус №12	10443,2	2936,5
Корпус №13	1736,8	490,2
Корпус №14	1744,2	470,1
Корпус №15	1754,4	498,0
Корпус №16	1949,4	549,0

Найменування будівлі	Річне споживання теплової енергії за:	
	базовим сценарієм	проектним сценарієм
	ГДж	ГДж
Корпус №17	4832,0	1684,2
Корпус №18	13525,8	4719,4
Корпус №19	13969,6	4767,6
Корпус №22	26103,1	8829,7
Корпус №23	6110,6	1719,2
Корпус №24	18659,1	7726,6
Гуртожиток № 6	2536,1	909,1
Гуртожиток № 7	2178,3	758,7
Гуртожиток № 12	3099,6	1145,5
Гуртожиток № 13	3211,6	1212,1
Гуртожиток № 14	3149,6	1182,6
Гуртожиток № 15	6911,2	2072,2
Гуртожиток № 16	4014,0	1526,4
Гуртожиток № 17	5272,3	1808,5

Під час аналізу економічної ефективності проєкту узагальнювалися техніко-економічні показники кожного звіту з енергоаудиту, горизонт планування - 20 років, зведені показники наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Узагальнені техніко-економічні показники проєкту термомодернізації

Перелік показників	Значення
1. Капіталовкладення, млн. євро без ПДВ	8
2. Дисконтований термін окупності	5,5 років
3. Економія традиційного палива, т.у.п./рік	4727,15
4. Чистий дисконтований дохід	928 769,98
5. Внутрішня норма дохідності, IRR	38,71%
6. Індекс прибутковості, PI	2,8

Проєкти підвищення енергоефективності інженерних систем окремих будівель КПІ ім.Ігоря Сікорського

1) Реконструкція системи вентиляції приміщень великого та малого басейнів Центру фізичного виховання та спорту (ЦФВС) КПІ ім. Ігоря Сікорського

У будівлі запроєктовано комбіновану систему: 32% - централізоване водяне і 68% повітряне опалення. Вже більше 15 років система припливно-витяжної вентиляції знаходиться частково у непрацюючому стані та потребує модернізації, що зумовлено як безпекою експлуатації, так і вимогами до мікроклімату. Основною проблемою у приміщеннях плавальних басейнів є наявність значних випаровувань вологи (за інструментальними вимірами $\varphi=86\div 92\%$). Для вирішення проблеми передбачається встановлення комплексу кліматичного обладнання: осушувача повітря для видалення вологи спільно з центральною припливно-витяжною вентиляційною системою та підігрів обхідних доріжок, що необхідне для дотримання санітарно-гігієнічних показників. Розрахункова економія енергії за сезон роботи басейну становить 1767 Гкал.

2) Модернізація системи опалення та вентиляції навчального корпусу №22

Передбачається модернізація тепlopункту, заміна однотрубної схеми на двотрубну; заміна розподільчих трубопроводів на труби сталеві електрозварні прямошовні; ізоляція трубопроводів та арматури системи опалення в неопалювальних приміщеннях ізоляційним матеріалом; заміна опалювальних приладів; встановлення термостатичних регуляторів на радіаторах та автоматичне балансування на стояках системи опалення. Для підтвердження працездатності технічного рішення, що пропонується, було виконано побудову моделі системи опалення будівлі в спеціалізованому програмному продукті HERZCO, виконані необхідні гідравлічні розрахунки та підібране обладнання системи опалення (з урахуванням утеплення огорожень). Теплове навантаження на опалення та вентиляцію вказано у табл.4.

Система вентиляції корпусу пропонується припливно-витяжна комбінована з рекуперацією (табл.5), також передбачене встановлення повітряно-теплової завіси при вході до будівлі, що зменшить потрапляння холодного повітря при відкриванні дверей.

Таблиця 4

Теплове навантаження корпусу до та після модернізації корпусу №22

Показник	Існуючий стан	Після модернізації
Розрахункове теплове навантаження на опалення	1,043 Гкал/год	0,365 Гкал/год
Розрахункове теплове навантаження на вентиляцію	0,834 Гкал/год	0,166 Гкал/год

Таблиця 5

Характеристика вентиляційних установок, що пропонуються для корпусу №22

Позначення системи	Найменування приміщення (технологічного обладнання), що обслуговується	Тип установки	Вентилятор			Повітрянагрівач				Кількість вент. установок шт.
			Тип	L, м ³ /год		Температура, °C		N, кВт		
				приплив	видалення	Р, Па	приплив/видалення	від	до	
ПВ	Аудиторія для студентів	MC035PEmini	320	320	200/400	-22	18	1,5	-	9
ПВ	Аудиторія для студентів	MC060PEmini	650	650	200/450	-22	18	2,0	-	56
ПВ	Аудиторія для студентів	MC100PEmini	850	850	200/450	-22	20	3,0	-	14
ПВ	Актова зала	MC-3	1800	1800	350/500	-22	18	-	15	6
ПВ	Актова зала	MC-5	3400	3400	450/550	-22	18	-	26	3
П1	Буфет		500	-	350	-22	18	-	7	1
В1	Буфет		-	500	450	-	-	-	-	1
П2	Загально-обмінна		1400	-	550	-22	18	-	18	1

3) Технічне переоснащення системи освітлення навчального корпусу № 24

Освітлювальні прилади, що використовуються, не задовольняють нормативні вимоги освітленості робочої поверхні (300лк). Розрахунки заміни світильників спираються на

необхідність забезпечення рівня освітленості відповідно до діючих вимог для різних типів приміщень. Термін окупності у разі реалізації проєкту становитиме 4,8 роки.

Екологічна оцінка проєкту. Зниження споживання енергоресурсів у споживачів сприяє непрямому (опосередкованому) зменшенню викидів парникових газів, узагальнені результати екологічної оцінки за окремими заходами наведено у таблиці 6.

Таблиця 6

Об'єми викидів CO₂ за рахунок впровадження проєкту

№ з/п	Найменування	Одиниця вимірювання	Значення
1	Зменшення енергоспоживання	кВт·год	7 524 035,51
2	Зменшення викидів CO ₂ за рахунок заміщення газу (заходи з модернізації систем опалення та вентиляції)	т/рік	1519,86
3	Зменшення викидів CO ₂ за рахунок заміщення газу (заходи з термомодернізації)	т/рік	6621,9
4	Збільшення викидів CO ₂ за рахунок споживання електроенергії	т/рік	1145,06
5	Загальне зменшення викидів CO ₂ при впровадженні проєкту	т/рік	6996,69

На рис. 1 наведено пооб'єктне скорочення викидів парникових газів після реалізації заходів за проєктом.

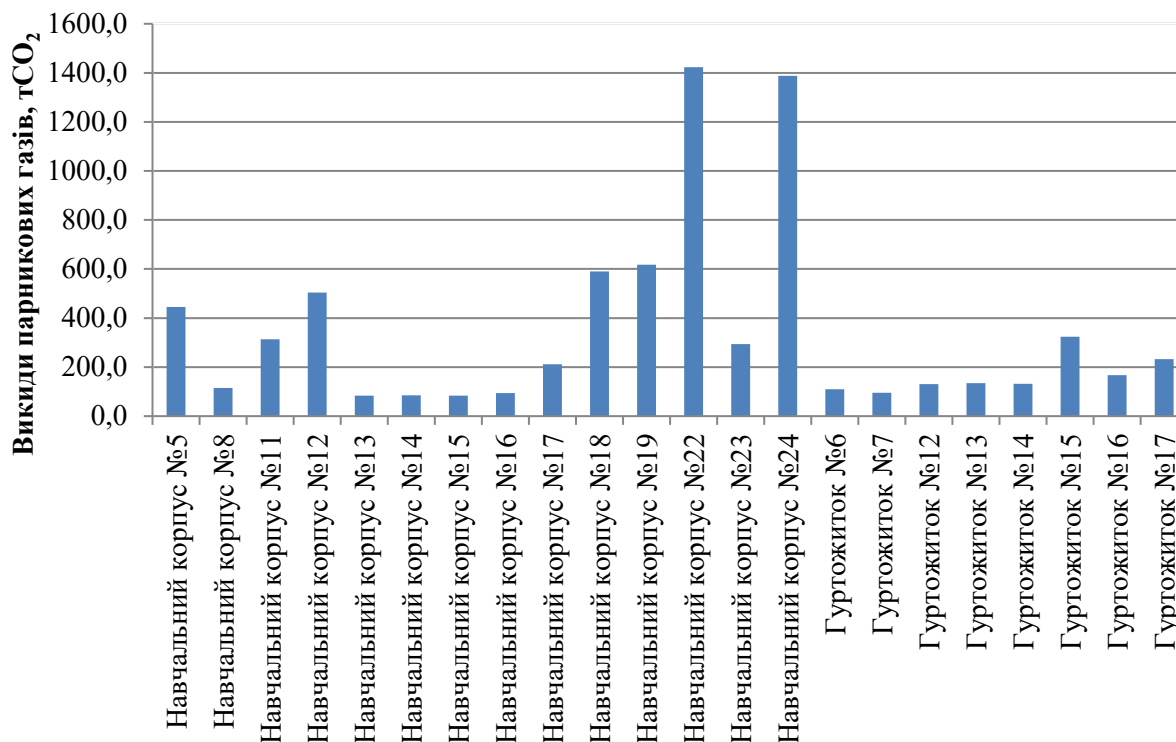


Рис. 1 Скорочення викидів парникових газів після реалізації заходів за Проєктом

Ризики проекту комплексної термомодернізації будівель. Економічні та регуляторні ризики: швидке зростання рівня інфляції, що буде супроводжуватися зміною рівня закупівельних цін, заробітної плати, вартості енергоносії; несвоєчасне надходження коштів, що може збільшити терміни введення в експлуатацію; нижчі в порівнянні з рівнем, що очікувався, ціни на енергоносії.

Технічні ризики: порушення графіка будівельних робіт, перевищення встановленого рівня витрат на етапах розробки проекту і будівництва, недостатньо ефективного здійснення робіт і збільшення експлуатаційних витрат.

Законодавчі ризики: недосконалість або неузгодженість нормативної бази; відсутність або суперечливість інструкцій судових або адміністративних органів при тлумаченні норм права. Інші ризики: політичні, валютні, дозвільні (отримання погоджень, дозволів і інших узгоджень, необхідних для остаточного оформлення фінансування).

Інвестиційний проект «Система віддаленого енергомоніторингу та управління енерговикористанням об'єктів КПП ім. Ігоря Сікорського». У складі університету є кафедри та фахівці, що спеціалізуються на розробці, впровадженні та супроводі сучасних Building Management System – систем автоматичного керування та централізованого моніторингу інтелектуальних будівель. Такі системи реалізують автоматизацію окремих установок: тепlopунктів, систем підтримання комфортного мікроклімату приміщень, освітлення, холодного та гарячого водопостачання, пожежної безпеки тощо.

Одним із важливих елементів покращення ефективності системи енергоменеджменту є системи автоматизації процесів управління енергоспоживанням та системи підтримки прийняття рішень. Такі системи дозволяють створити автоматизоване робоче місце енергоменеджера (АРМЕ), підвищити оперативність вирішення задач розподілу енергоресурсів, якість рішень, що приймаються в системі управління, і як наслідок знизити економічні ризики від несвоєчасних та помилкових рішень.

Проектом передбачається:

- створення лабораторії/диспетчерського пункту;
- створення програмного забезпечення, що включатиме: геоінформаційну базу даних, цифрову карту території з будівлями та інженерними мережами; АРМЕ з різними правами та рівнями доступу користувачів; автоматизований облік і аналіз даних, виявлення аварійних ситуацій, моніторинг мікроклімату приміщень; формування звітів; аналітичний блок та захист даних.

Система віддаленого енергомоніторингу дозволить усунути проблему «людського фактору» та надасть ресурси для всебічного постійного аналізу стану енергоспоживання університету, а також може виступати одночасно майданчиком для проведення науково-дослідних робіт та підвищить якість освітніх послуг. Як практичний результат проекту передбачається створення навчальних дисциплін «Система управління фондом будівель» та «Системи життєзабезпечення будівель» з розробкою циклу лабораторно-практичних робіт, інтегрованих в реальне життя навчального закладу. Також планується використання розробленого програмного забезпечення та бази даних про енергоспоживання університету в існуючих навчальних дисциплінах: «Методи аналізу та енергомоніторингу», «Енергетичний аудит», «Енергозбереження будівель та споруд».

Висновки. У статті узагальнено досвід співпраці різних факультетів КПІ ім. Ігоря Сікорського зі Службою енергоменеджменту для розробки інвестиційних проєктів підвищення енергоефективності університету. Наведено технічні, економічні та екологічні показники для інвестиційних проєктів комплексної термомодернізації будівель, модернізації інженерних систем окремих будівель. Запропоновано проєкт автоматизованої системи моніторингу для закладу освіти та описано структурні елементи програмного забезпечення. Показано можливості залучення наукового потенціалу закладу для підвищення якості освітніх послуг.

Література

1. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
2. Білоус І.Ю. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / І.Ю.Білоус, В.І.Дешко, І.О.Суходуб, Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. – К.: Політехніка, 2015. – 188 с.
3. Свідоцтво авторського права на науковий твір "Положення про систему мотивації ощадливого енерговикористання підрозділами ВНЗ", №55959 від 06.08.2014р.
4. Євтухов В.Я. Інформаційна та мотиваційна складові системи енергетичного менеджменту об'єктів галузі освіти / Євтухов В.Я., Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Шевченко О.М. // Новини енергетики. – 2018. – №5. – с.10-23.
5. Шевченко О.М. Енергоефективний кампус КПІ: інструменти та методи досліджень / О.М. Шевченко, М.М. Шовкалюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2019. № 4 (136). – С. 97–105.
6. Дешко В.І. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проєктів з підвищення енергоефективності / В.І. Дешко, І.О.Суходуб, П.Ю. Сердечний // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2019. – № 4 (136). – С. 86–96.
7. Efficiency of using energy in housing sector, under the general editorship of A.M. Pavlenko. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.

References

1. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
2. Bilous, I.Yu., Dushko, V.I., Sukhodub, I.O., Shevchenko, O.M., & Shovkaliuk, M.M. (2015) Upravlinnia efektyvnosti enerhovikorystannia u vyshchikh navchalnykh zakladakh: monohrafiia. [Energy efficiency management in higher education institutions: monograph]. Kyiv: Politehnika [in Ukrainian].
3. Cvidotstvo avtorskoho prava na naukovyi tvir «Polozhennia pro systemu motyvatsii oshchadlyvoho enerhovikorystannia pidrozdilamy VNZ» [Certificate of copyright for the scientific work «Regulations on the system of motivation of economical energy use by departments of higher education institution»], №55959 from 06.08.2014. Kyiv [in Ukraine].
4. Yevtukhov, V.Ya., Dushko, V.I., Shovkalyuk, M.M., et al. (2018). Informatsiina ta motyvatsiina skladovi systemy enerhetychnoho menedzhmentu ob'ektiv haluzi osvity [Information and motivational components of the energy management system of objects of education]. Novyny enerhetyky – Energy News, 5, 10–23 [in Ukraine].
5. Shevchenko, O.M., Shovkaliuk, M.M. (2019). Enerhoefektyvnyi kampus KPI: instrumenty ta metody doslidzhen [KPI energy efficient campus: tools and research methods]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu. Seriiia Tekhnichni nauky – Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. Technical Sciences Series, 4 (136), 97–105 [in Ukraine].
6. Dushko, V.I., Sukhodub, I.O., Serdechnyi, P.Yu. (2019). Vykorystannia enerhetychnoho modeliuвання budivel pry rozrobtsi proektiv z pidvyshchennia enerhoefektyvnosti [The use of energy modeling of buildings in the development of projects to improve energy efficiency]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu. Seriiia Tekhnichni nauky – Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. Technical Sciences Series, 4 (136), 86–96 [in Ukraine].
7. Efficiency of using energy in housing sector, under the general editorship of A.M. Pavlenko. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.

8. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6 – 31:2016. – [Чинні від 2016–10–08, на заміну ДБН В.2.6–31:2006.] // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2016. – 33 с.

9. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні / ДСТУ-Н Б А.2.2-12:2015 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2015, – 199 с.

10. EN 15232:2007. Energy performance of buildings – Impact of building Automation, Controls and Building Management. – CEN. – European Committee for Standardization, 2007.

11. Будівельна кліматологія: ДСТУ -Н Б В.1.1–27:2010. – [Чинні від 2011-11-01] // Мінрегіонбуд України. К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с.

8. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osviltlenni ta hariachomu vodopostachanni [Energy performance of buildings. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water]. (2015) DSTU-N B A.2.2-12: 2015 –Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].

9. Teplova izoliatsiia budivel [Thermal insulation of buildings]. (2016) DBN V.2.6–31:2016. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].

10. EN 15232:2007. Energy performance of buildings – Impact of building Automation, Controls and Building Management. – CEN. – European Committee for Standardization, 2007.

11. Budivelna klimatolohiia [Protection against the dangerous geological processes, harmful operational influences, against the fire. Building climatology]. (2010) DSTU-N B V.1.1–27: 2010 –Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].

SHEVCHENKO OLENA

alenashevchenko@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9304-5432>

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SHOVKALIUK MARYNA

madam.mari@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1898-3493>

ResearcherID: K-5822-2017

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

РАЗРАБОТКА ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТУДГОРОДКА КПИ И ИНТЕГРАЦИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

ШЕВЧЕНКО Е.Н., ШОВКАЛЮК М.М.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Цель. Разработка и анализ основных показателей инвестиционного проекта термомодернизации зданий студенческого кампуса КПИ и управление энергопотреблением за счет удаленного мониторинга с интеграцией в образовательный процесс.

Методика. Выполнен технико-экономический анализ с использованием инженерных методик расчета, экспериментальные измерения с применением лабораторного оборудования. Применяются общенаучные методы анализа и синтеза, специфические методы (группировка, сравнение, обобщение), статистическая обработка данных, моделирование в специализированных программных продуктах.

Результаты. Уменьшение общего потребления энергетических ресурсов, а также денежных затрат на их оплату; создание инструментальной базы для научно-исследовательских работ; повышение качества предоставления образовательных услуг, привлечение студентов к выполнению энергетических обследований; разработка программного обеспечения и создание системы автоматизированного мониторинга энергопотребления.

Научная новизна. Разработан комплексный подход к разработке инвестиционных проектов повышения энергоэффективности студгородков с учетом технических, экономических и экологических показателей с углубленным инженерным анализом характеристик зданий и их инженерных систем. Предложены новые подходы к разработке автоматизированного рабочего места энергоменеджера со структурными элементами программного обеспечения системы энергомониторинга,

Практическая значимость. Разработан инвестиционный проект комплексной термомодернизации зданий студенческого кампуса и модернизации инженерных сетей отдельных зданий с выбором оборудования и разработкой схем размещения. Определены основные технико-экономические и экологические показатели проекта. Важное образовательное направление - привлечение студентов к процессу разработки инвестиционных проектов с использованием современных технологий на примере объектов студгородка, что позволит создать среду для комфортных условий обучения и проведения исследований. Реализация инвестиционного проекта позволит на основе существующего старого фонда зданий создать современную энергоэффективную площадку с использованием инновационных решений.

Ключевые слова. Энергопотребление, кампус, энергетическая эффективность, здания, термомодернизация.

DEVELOPMENT OF INVESTMENT PROJECTS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF KPI STUDIO TOWN AND INTEGRATION INTO THE EDUCATIONAL PROCESS SHEVCHENKO O.M., SHOVKALIUK M.M.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Purpose. Development and analysis of the main indicators of the investment project of the thermo-modernization of the student campus KPI and energy consumption management for the development of monitoring and integration in the educational process.

Method. The technical and economic analysis with use of engineering methods of calculation, experimental measurements with use of the laboratory equipment is executed. General scientific methods of analysis and synthesis, specific methods (grouping, comparison, generalization), statistical data processing, modeling in specialized software products are used.

Results. Reduction of total consumption of energy resources, as well as monetary costs for their payment; creation of conditions and tool base for research works; improving the quality of educational services, involving students in energy audits; software development and creation of an automated energy consumption monitoring system.

Scientific novelty. A comprehensive approach to the development of investment projects to improve the energy efficiency of campuses, taking into account technical, economic and environmental indicators with in-depth engineering analysis of the characteristics of buildings and their engineering systems. New approaches to the development of an automated workplace of an energy manager with structural elements of the software of the energy monitoring system are proposed.

Practical significance. An investment project of complex thermal modernization of student campus buildings and modernization of engineering networks of individual buildings with a choice of equipment and development of placement schemes has been developed. The main technical, economic and environmental indicators of the project are determined. An important educational direction is to involve students in the process of developing investment projects using modern technologies on the example of campus facilities, which will create an environment for comfortable learning conditions and research. The implementation of the investment project will allow to create a modern energy-efficient site with the use of innovative solutions on the basis of the existing old building stock.

Keywords: energy consumption, campus, energy efficiency, buildings, thermal modernization.

УДК 677.017

ЗДОРЕНКО В.Г.¹, БАРИЛКО С.В.¹, ЛІСОВЕЦЬ С.М.¹,
ШИПКО Д.О.¹, ВАСИЛЕНКО В.М.¹, ПАЛІЙ Б.М.²

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДБИТТЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ВІД ОДНОШАРОВИХ ТЕКСТИЛЬНИХ ПОЛОТЕН ТА ДВОШАРОВИХ ТЕКСТИЛЬНИХ ПАКЕТІВ ІЗ РІЗНИМ РОЗМІРОМ ПОР

Мета. Дослідити вплив структури одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів на параметри ультразвукових хвиль, які взаємодіють з ними. Зокрема, дослідити залежність комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль від загальної товщини та поверхневої густини текстильного матеріалу.

Методика. Аналітична частина дослідження полягала в отриманні виразу для комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль і в моделюванні його залежності від товщини та поверхневої густини різних текстильних матеріалів. Запропонований метод контролю цих технологічних параметрів полягає в опроміненні текстильних матеріалів ультразвуковими хвилями з подальшим прийомом відбитих від текстильного матеріалу хвиль, їх оцифруванням та проведенням комп'ютерного аналізу отриманих результатів.

Результати. Отримані аналітичні вирази, які пов'язують між собою товщину та поверхневу густину одношарових полотен, двошарових текстильних пакетів із складною просторовою структурою, з одного боку, і коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль від таких матеріалів, з іншого боку. Зроблені аналітичні розрахунки та проведено математичне моделювання за результатами теоретичних досліджень.

Наукова новизна. У результаті проведених теоретичних досліджень визначено, яким чином впливають на відбиття ультразвукових хвиль товщини і властивості кожного з двох шарів пористих текстильних матеріалів. Це дає змогу на основі ультразвукових вимірювань визначати як загальну товщину текстильних матеріалів, так і їх поверхневу густину з точністю, необхідною при їх виробництві.

Практична значимість. Отримані аналітичні залежності є ще одним кроком до створення контрольно-вимірювального обладнання для визначення властивостей одношарових текстильних полотен та двошарових пористих текстильних пакетів. Це допоможе у визначенні загальної товщини та поверхневої густини матеріалів із складною просторовою структурою.

Ключові слова: одношарове текстильне полотно, двошаровий текстильний пакет, товщина, поверхнева густина, пористість, просторова структура, ультразвукова хвиля.

Вступ. На теперішній час існує необхідність у безконтактному оперативному контролі основних технологічних параметрів різних одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів з різною внутрішньою просторовою структурою, яка часто характеризується пористістю. Одними із методів, за допомогою яких можна проводити подібний контроль [1] із допустимою похибкою, є ультразвукові безконтактні методи. Особливістю відбиття ультразвукових хвиль від пористого матеріалу є те, що внаслідок наскрізних пор значного розміру ультразвукові хвилі можуть взагалі не відбиватися від матеріалу. Тому такий метод контролю пористих текстильних матеріалів [2] з відбиттям ультразвукових хвиль слід застосовувати при порах малого розміру в структурі самого контрольованого полотна. Якщо прозвучувати перший суцільний шар двошарового текстильного пакету із значно меншою товщиною, то амплітуда ультразвукових хвиль, які

відбиваються від нього, буде більшою у порівнянні з амплітудою хвиль, що відбиваються від другого шару пакету з порами. Також необхідно розглянути залежності амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль від товщини матеріалів із різною структурою з великими та малими порами, що можна використати для створення нових засобів контролю цього параметру. Вирази амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, де товщина текстильного матеріалу показана через суму умовних діаметрів нитки основи та утоку для тканини, дадуть змогу визначати цей параметр з урахуванням деформації ниток, пористості та її фазової будови. Інший параметр – поверхнева густина текстильних матеріалів, може визначатися за допомогою виразів, що враховують також і структуру полотна [3]. Текстильний матеріал може також контролюватися за поверхневою густиною із використанням ультразвукових хвиль, що відбиватимуться від нього в імпульсному режимі роботи перетворювачів. Поверхнева густина різних одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів дає можливість визначати їхні якісні характеристики безпосередньо в процесі виробництва.

Аналіз взаємодії відбитих ультразвукових хвиль з різними одношаровими текстильними полотнами та двошаровими текстильними пакетами дозволить у майбутньому реалізувати безконтактний оперативний контроль різних параметрів таких матеріалів.

Постановка завдання. Серед пористих текстильних пакетів широке розповсюдження отримали пакети, які мають два шари. Причому такі шари можуть відрізнятися один від одного в декілька раз як за товщиною, так і за пористістю. Така особливість будови матеріалів суттєво впливає на ультразвукові хвилі, які є зондувальними для них. З урахуванням цього, поставлено наступні задачі дослідження.

По-перше, це отримання амплітудних співвідношень, які відображають вплив на зондуючі ультразвукові хвилі пористості і товщин кожного з шарів текстильного пакету, на які, в свою чергу, впливають товщини ниток основи і утоку та їх переплетіння. По-друге, це використання отриманих співвідношень для контролю деяких технологічних параметрів таких матеріалів, а саме – їх товщини та поверхневої густини.

Результати дослідження. Так як процес взаємодії ультразвукових хвиль з пористими матеріалами характеризується значною складністю [4-8], то для її аналітичного дослідження і опису є декілька підходів. Один з них, який часто застосовується, полягає у використанні спектрального методу досліджень. Він дозволяє досліджувати розповсюдження ультразвукових хвиль довільної форми [9] (наприклад, ультразвукових імпульсів із заданою обвідною).

Так як в спектрі ультразвукового імпульсу є коливання з різними частотами, то при використанні такого методу досліджень робиться припущення, що є справедливим принцип суперпозиції [10], і що дисперсія швидкості c ультразвукових хвиль практично відсутня. Тобто ультразвуковий імпульс розповсюджується як «єдине ціле». У якості параметра середовища розповсюдження ультразвукових хвиль, який піддається збуренню, зазвичай розглядається зміна тиску p в цьому середовищі.

Згідно з таким спектральним підходом, тиск $p_B(\tau)$ в ультразвукових хвилях, які відбилися від матеріалу, можна представити наступним чином:

$$p_B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_B(\omega) S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

де $S(\omega)$ – спектральна щільність ультразвукових хвиль, які падають на матеріал; $V_B(\omega)$ – частотно-залежний комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль; ω – колова частота; τ – параметр, для якого виконується умова (в одновимірному випадку):

$$\tau = \frac{x}{c} - t, \quad (2)$$

де x – координата; c – швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль; t – час.

Тепер розглянемо одношарове текстильне полотно (див. рис. 1) з коефіцієнтом об'єму повітря в порах K , об'ємною щільністю ρ_2 матеріалу полотна, швидкістю розповсюдження ультразвукових хвиль в матеріалі полотна c_2 , коефіцієнтом згасання ультразвукових хвиль в матеріалі α_2 та поверхневою густиною m_s .

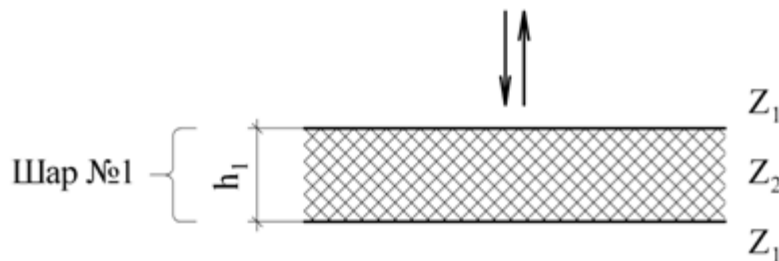


Рис. 1. Схема відбиття ультразвукових хвиль від одношарового текстильного полотна

Для даного випадку акустичний опір середовища, з якого падають на матеріал полотна ультразвукові хвилі, і акустичний опір середовища по іншу сторону від полотна позначається як Z_1 , а акустичний опір шару матеріалу позначається як Z_2 . Комплексний коефіцієнт відбиття $V_B(\omega)$ в такому випадку матиме наступний вигляд:

$$V_B(\omega) = \frac{\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_2\right)} \cdot \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_2\right)} \cdot \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}}. \quad (3)$$

Сам вираз для амплітуди відбитого імпульсного ультразвукового сигналу від текстильного одношарового полотна у відносних одиницях можна подати як [1]:

$$\begin{aligned}
 A_V(t) = & \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(\omega_0 \left(\frac{K m_s (2Nb \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \right) \times \\
 & \times \exp \left(- \frac{\left(\frac{K m_s (2Nb \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_3 \cdot 2N K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2} \right) \\
 & - \cos \left(\omega_0 \left(\frac{K m_s (b(2N+2) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \\
 & \times \exp \left(- \frac{\left(\frac{K m_s (b(2N+2) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_3 \cdot (2N+2) K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Модельовання залежності модуля комплексного коефіцієнта відбиття $|V_B|$ від коефіцієнта згасання α_2 і від комплексного параметра $m_s \rho_2^{-1} \lambda_2^{-1}$ для текстильних полотен виконано в пакеті РТСMathCADPrime 5 (див. рис. 2). Введення параметру довжини ультразвукових хвиль λ_2 в матеріалі з акустичним опором Z_2 обумовлене зручністю оцінки впливу волокон текстилю та пористості на модуль комплексного коефіцієнту відбиття $|V_B|$. Одразу три складові цього параметру m_s , ρ_2 і λ_2 (при цьому добуток $m_s \rho_2^{-1} \lambda_2^{-1}$ є безрозмірним) можуть мати великий вплив на модуль $|V_B|$.

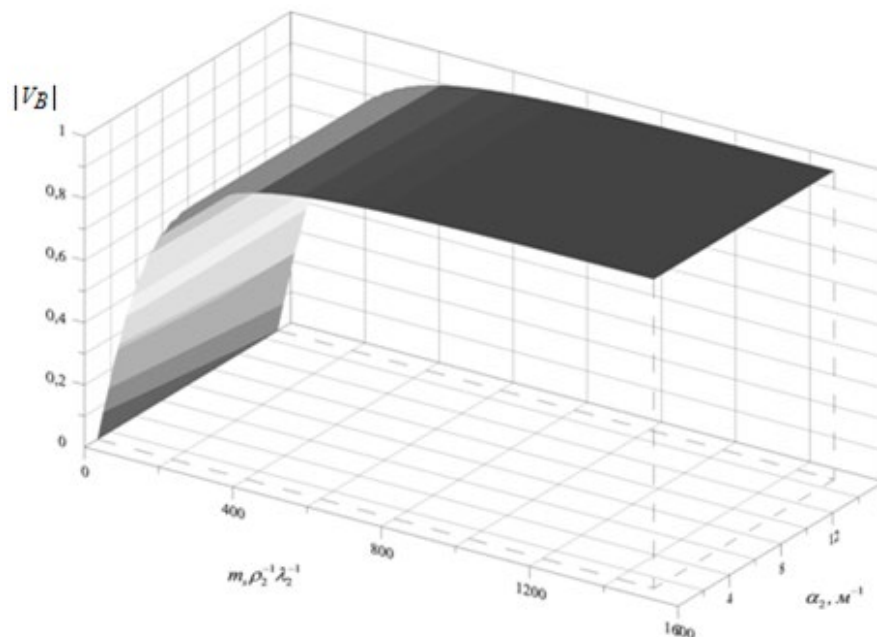


Рис. 2. Вплив на $|V_B|$ коефіцієнта згасання α_2 і комплексного параметра $m_s \rho_2^{-1} \lambda_2^{-1}$

З проведеного модельовання видно, що для текстильних матеріалів з порами,

згасанням ультразвукових хвиль, які відбиваються від полотна матеріалу, можна знехтувати.

Також розглянемо спрощено схему розташування шарів у двошаровому пористому пакеті та відбивання від нього ультразвукових хвиль (див. рис. 3). Шар №1 має товщину h_1 , а шар №2 має товщину h_2 .

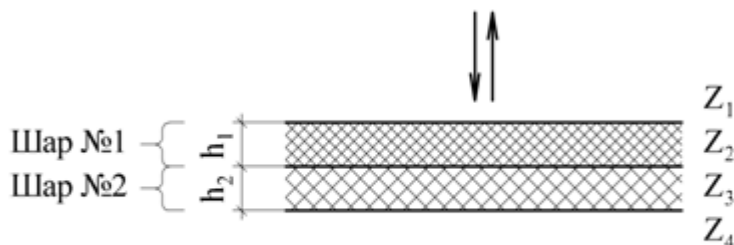


Рис. 3. Схема розташування шарів в двошаровому пористому пакеті

Акустичний опір середовища, з якого падають на текстильний пакет ультразвукові хвилі, має позначення Z_1 , акустичний опір шару №1 – позначається як Z_2 , акустичний опір шару №2 – позначається як Z_3 і акустичний опір середовища по іншу сторону від пакету – позначається як Z_4 . У переважній більшості випадків, які мають практичне значення, текстильний пакет, що досліджується, знаходиться в повітряному середовищі, а опори Z_1 і Z_4 дорівнюють акустичному опору повітря.

Якщо величина $V_L = 1 - \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4}\right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}\right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}\right)$ для двошарових пористих текстильних пакетів та виконується умова $h_1 \approx h_2$, тоді комплексний коефіцієнт відбиття $V_B(\omega)$ приймає наступний вигляд [10]:

$$V_B(\omega) = \frac{\sqrt{V_L} - \sqrt{V_L} \cdot e^{2j \left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j \alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}}{1 - V_L \cdot e^{2j \left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j \alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}}, \quad (5)$$

де c_{23} – усереднена швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в шарах №1 і №2; α_3 – усереднений коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль в шарах №1 і №2; b – коригувальний коефіцієнт.

Формулу (5) з кількістю N перевідбивань хвиль у текстильному пакеті зручніше для подальших перетворень подати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 V_B(\omega) = & \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-2N \left(-j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)} - \\
 & - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-(2N+2) \left(-j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Комплексний коефіцієнт відбиття $V_B(\omega)$ дозволяє встановити залежність амплітудних параметрів відбитої ультразвукової хвилі на товщину та поверхневу густину контрольованого текстильного пакету. Особливістю матеріалів із складною просторовою структурою, і особливо текстильних матеріалів з різним розміром пор, є те, що коефіцієнт $V_B(\omega)$ може змінюватися в широкому діапазоні значень: це стосується змін як амплітуди кожної гармонійної складової ультразвукової хвилі, так і її фазового зсуву. Така особливість вимагає ускладнювати будову обладнання для визначення властивостей текстильних матеріалів (наприклад, застосовуючи автоматичне регулювання коефіцієнтів підсилення певних блоків для приведення амплітуди прийнятого сигналу до заданого рівня).

Якщо, наприклад, шари №1 і №2 текстильного пакету мають досить малі пори, то коефіцієнт $V_B(\omega)$ досягає своїх максимальних значень. Але якщо ці шари мають багато пор (матеріал має велику пористість), то ультразвукові хвилі проходять такий пакет, практично не взаємодіючи з ним, і коефіцієнт $V_B(\omega)$ прямує до своїх мінімальних значень. Ще більш складна взаємодія може спостерігатися у багатошарових пакетах, які мають як шари з малими порами, так і шари з великими порами.

Виконавши підстановку формули (6) в (1) і перейшовши від параметра τ до часу t , можна отримати наступний вираз:

Залежність (7) для імпульсного ультразвукового сигналу можна показати з підінтегральними виразами, один з яких характеризує комплексне відбиття від межі двошарового пакету, а інший характеризує відбиття хвилі з подвійним її проходженням загальної товщини пакету. Покажемо цей вираз наступним чином:

$$\begin{aligned}
 P_B(t) = & \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-2N \left(-j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega - \\
 & - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-(2N+2) \left(-j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega.
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$P_B(t) = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{P_0 \tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \cdot \left[e^{-\left(\frac{\omega_0 \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2} - \alpha_3 \cdot 2N(h_1 + h_2) \right] \times \\
 \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) + \frac{2\omega_0 \tau_0^2}{(4 \ln \sqrt{2})^2} \right) \omega} d\omega - \\
 - e^{-\left(\frac{\omega_0 \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+2)(h_1 + h_2) \times \\
 \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j \left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) + \frac{2\omega_0 \tau_0^2}{(4 \ln \sqrt{2})^2} \right) \omega} d\omega \right] \quad (8)$$

де P_0 – амплітуда тиску в ультразвукових хвилях, які падають на контрольований текстильний пакет; ω_0 – колова частота ультразвукових хвиль, з яких формуються пакети коливаний; τ_0 – тривалість пакетів ультразвукових хвиль.

Якщо формулу (8) проінтегрувати і виділити з неї дійсну та уявну частини, то можна отримати наступний вираз:

$$P_B(t) = \operatorname{Re} P_B(t) + j \operatorname{Im} P_B(t) = P_0 \cdot \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \times \\
 \times \left(\left(\cos \left(\omega_0 \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) + j \sin \left(\omega_0 \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \times \right. \\
 \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot 2N(h_1 + h_2) \right] - \\
 \left. - \left(\cos \left(\omega_0 \left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) + j \sin \left(\omega_0 \left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \times \right. \\
 \left. \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+2)(h_1 + h_2) \right] \right) \quad (9)$$

Формули (5) і (6) для визначення комплексного коефіцієнта відбиття $V_B(\omega)$, так само

як і формули (8) і (9) для визначення тиску $p_B(t)$ В ультразвукових хвилях, були отримані для двошарових текстильних пакетів з досить малими порами, якими можна знехтувати. Якщо в таких матеріалах порами вже не можна знехтувати і вони є значними, тоді вводиться параметр кута ν . При наявності наскрізних пор у двошаровому текстильному пакеті амплітуда ультразвукових хвиль, що відбиваються від пакету, зменшується. За зміну пропускання ультразвукових хвиль від зміни розмірів самих пор відповідає величина $\cos \nu$, де ν – кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, і поверхнею двошарового текстильного пакету. Враховуючи залежність (9), запишемо тепер вираз для зміни амплітуди відбитих ультразвукових хвиль від двошарового текстильного пакету у часі з врахуванням наскрізних пор наступним чином:

$$A_V(t) = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \times$$

$$\times \left(\cos \left(\omega_0 \left(\frac{2Nb(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right) \right) \cdot \exp \left[- \frac{\left(\frac{2Nb(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot 2N(h_1+h_2)\cos \nu \right] - \right. \quad (10)$$

$$\left. - \cos \left(\omega_0 \left(\frac{b(2N+2)(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right) \right) \times \right.$$

$$\left. \times \exp \left[- \frac{\left(\frac{b(2N+2)(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+2)(h_1+h_2)\cos \nu \right] \right).$$

Амплітуда $A_V(t)$ з виразу (10) подається не в абсолютних, а у відносних одиницях. При цьому, потрібно обов'язково враховувати розмір міжволоконних відстаней текстильного матеріалу, які впливають на об'ємну щільність полотна.

Висновки. Залежності амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль від поверхневої густини або від товщини одношарових текстильних полотен, двошарових текстильних пакетів з порами та без них можна використати при створенні нових методів та засобів контролю цих параметрів. Поверхнева густина текстильних матеріалів може визначатися за допомогою виразів отриманих в роботі, що враховують також і структуру полотна. Цей параметр може контролюватися безперервно в процесі виробництва за допомогою ультразвукових хвиль, які відбилися від контрольованого матеріалу. Розглянуто питання згасання ультразвукових хвиль у їх частотному діапазоні, який підходить для безконтактного контролю, у порівнянні з об'ємною щільністю або поверхневою густиною наведених раніше матеріалів з різною структурою. Шляхом комп'ютерного моделювання

показано, що згасання амплітуди ультразвукових хвиль у пористому матеріалі мало впливатиме на точність приладів, побудова яких базуватиметься на залежностях взаємодії ультразвукових хвиль із складною структурою текстильних матеріалів. Зазначене дозволить створювати прилади безконтактного контролю різних технологічних параметрів для одношарових текстильних полотен та двошарових пакетів в процесі їх виробництва.

Література

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Костюков А.Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью акустических колебаний / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. — 2010. — № 3. — С. 94—98.
5. Костюков А.Ф. Метод контроля технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. — 2013. — № 1. — С. 96—99.
6. 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.
7. Здоренко В.Г. Технологічний контроль текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко // Метрологія та прилади. — 2017. — №5. — С. 86 — 88.
8. Здоренко В.Г. Дослідження застосування ультразвукового

References

1. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Doslidzhennya prohodzheniya 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].
2. 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].
3. 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 politehnichnogo institutu. — Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute, 3, 7 — 11 [In Ukrainian].
4. Kostukov, A.F. (2010). Model registracii priznakov mnogoslojnoj struktury s pomoshyu akusticheskikh kolebanij [The Registration Model of features of the multilayer structure using acoustic oscillations]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 3, 94 — 98 [In Russian].
5. Kostukov, A.F. (2013). Metod kontrolya tehnologicheskikh parametrov selskohozyajstvennyh volokon s pomoshyu ultrazvuka [The method of monitoring the technological parameters of agricultural fibers using ultrasound]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 1, 96 — 99 [In Russian].
6. Kandrin, Yu.V., Tsybalist O.V., & Vorobiev N.P. (2011). Skorost rasprostraneniya ultrazvukovyh kolebanij v volokonnoj srede [The propagation velocity of ultrasonic vibrations in a fiber medium]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 1, 95 — 98 [In Russian].
7. 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].
8. Zdorenko, V.G., Barylko, O.V., Barylko, S.V., Lisovets S.N., & Lebedyuk T.V. (2018). Doslidzhennya

безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко, С.М. Лісовець, Т.В. Лебедюк // Вісник ХНТУ. – 2018. – №4(67). – С. 152 – 161.

9. Меркулов Л.Г. Прохождение и отражение ультразвукового импульса для плоскопараллельной пластины в жидкости / Л.Г. Меркулов, В.М. Веревкин // Дефектоскопия. – 1965. – №5. – С. 13 – 21.

10. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. — М.: Наука, — 1973. — 343 с.

zastosuvannya ultrazvukovogo bezkontaktного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва [Investigation of the use of ultrasonic non-contact method for determining technological parameters for the weaving process]. Visnik KhNTU. — Visnyk of Kherson National Technical University, 4, 152 — 161 [In Ukrainian].

9. Merkulov L.G., & Verevkin, V.M. (1965). Prohozhdenie i otrazhenie ultrazvukovogo impulsa dlya ploskoparallelnoy plastiny [The passage and reflection of an ultrasonic pulse for a plane-parallel plate in a liquid]. Defektoskopiya. — Flaw detection, 5, 13 — 21 [In Russian].

10. Brekhovskikh, L.M. (1973). Volny v sloistyyh sredah [The waves in layered medium]. Moscow: Nauka [In Russian].

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

VASYLENKO V.

ORCID: 0000-0003-3482-2750

Scopus ID: 57210801224

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210801224>

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

PALII B.

paliib97@gmail.com

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ ОДНОСЛОЙНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН И ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПАКЕТОВ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ПОР

ЗДОРЕНКО В. Г.¹, БАРЫЛКО С. В.¹, ЛИСОВЕЦ С. Н.¹, ШИПКО Д. А.¹,

ВАСИЛЕНКО В. Н.¹, ПАЛИЙ Б.М.²

¹Київський національний університет технологій і дизайну

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Цель. Исследовать влияние однослойных текстильных полотен и двухслойных текстильных пакетов на параметры ультразвуковых волн, которые взаимодействуют с ними. В частности, исследовать зависимость комплексного коэффициента отражения ультразвуковых волн от общей толщины и поверхностной плотности текстильного материала.

Методика. Аналитическая часть исследования заключалась в получении выражения для комплексного коэффициента отражения ультразвуковых волн и в моделировании его зависимости от толщины и поверхностной плотности различных текстильных материалов. Предложенный метод контроля этих технологических параметров заключается в облучении текстильных материалов ультразвуковыми волнами с последующим приемом отраженных от текстильного материала волн, их оцифровкой и проведением компьютерного анализа полученных результатов.

Результаты. Полученные аналитические выражения, связывающие между собой толщину и

поверхностную плотность однослойных полотен, двухслойных текстильных пакетов со сложной пространственной структурой, с одной стороны, и коэффициент отражения ультразвуковых волн от таких материалов, с другой стороны. Сделанные аналитические расчеты и проведено математическое моделирование с результатами теоретических исследований.

Научная новизна. В результате проведенных теоретических исследований определено, каким образом влияют на отражение ультразвуковых волн толщины и свойства каждого из двух слоев пористых текстильных материалов. Это позволяет на основе ультразвуковых измерений определять как общую толщину текстильных материалов, так и их поверхностную плотность с точностью, необходимой при их производстве.

Практическая значимость. Полученные аналитические зависимости являются еще одним шагом к созданию контрольно-измерительного оборудования для определения свойств однослойных текстильных полотен и двухслойных пористых текстильных пакетов. Это поможет в определении общей толщины и поверхностной плотности материалов со сложной пространственной структурой.

Ключевые слова: однослойное текстильное полотно, двухслойный текстильный пакет, толщина, поверхностная плотность, пористость, пространственная структура, ультразвуковая волна.

RESEARCH OF REFLECTION OF ULTRASONIC WAVES FROM SINGLE-LAYER TEXTILE FABRICS AND DOUBLE-LAYER TEXTILE PACKAGES WITH DIFFERENT SIZES OF PORES

ZDORENKO V. G.¹, BARYLKO S. V.¹, LISOVETS S. N.¹, SHIPKO D. A.¹,
VASYLENKO V. M.¹, PALII B.M.²

¹Kyiv National University of Technologies & Design

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Purpose. Investigate the influence of single-layer textile fabrics and two-layer textile bags on the parameters of ultrasonic waves that interact with them. In particular, to investigate the dependence of the complex reflection coefficient of ultrasonic waves on the total thickness and basis weight of textile material.

Methodology. The analytical part of the study consisted in obtaining an expression for the complex reflection coefficient of ultrasonic waves and in modeling its dependence on the thickness and basis weight of different textile materials. The proposed method of control of these technological parameters consists in irradiation of textile materials with ultrasonic waves with the subsequent reception of the waves reflected from textile material, their digitization and carrying out the computer analysis of the received results.

Findings. Analytical expressions are obtained that relate the thickness and basis weight of single-layer canvases, two-layer textile bags with a complex spatial structure, on the one hand, and the reflection coefficient of ultrasonic waves from such materials, on the other hand. Analytical calculations were made and mathematical modeling was performed based on the results of theoretical research.

Originality. As a result of theoretical studies, it is determined how the thickness and properties of each of the two layers of porous textile materials affect the reflection of ultrasonic waves. This makes it possible on the basis of ultrasonic measurements to determine both the total thickness of textile materials and their basis weight with the accuracy required for their production.

Practical value. The obtained analytical dependences are another step towards the creation of control and measuring equipment to determine the properties of single-layer textile fabrics and two-layer porous textile bags. This will help determine the overall thickness and basis weight of materials with a complex spatial structure.

Keywords: single-layer textile fabric, two-layer textile package, thickness, basis weight, porosity, spatial structure, ultrasonic wave.

УДК 677.025:620.17

ЄЛІНА Т.В., ПУХОВА А.В., РОМАНЮК В.П.,
ГАЛАВСЬКА Л.Є.

Київський національний університет технологій та дизайну

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ОДНОВІСНОГО РОЗТЯГУ ТРИКОТАЖУ ПЕРЕПЛЕТЕННЯ ЛАСТИК РІЗНИХ РАПОРТІВ

Мета. Вивчення процесу деформування трикотажу ластичних переплетень, що відбувається внаслідок прикладання розтягуючих зусиль у напрямку петельних рядів.

Методи досліджень: У ході роботи використано методи теоретичного аналізу, фотокамера, розтяжна рамка, програмне забезпечення Microsoft Excel та Autodesk AutoCAD.

Результати досліджень. Для виготовлення зразків трикотажу ластичних переплетень використано плоскофангову машину ПВРК 10-го класу. Дослідні зразки трикотажу вироблено переплетенням ластик з рапортом 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 та 6x6 з бамбукової пряжі лінійної густини 29x2 текс, вовняної пряжі – 32x2 текс, напіввовняної пряжі - 31x2 текс та поліакрилонітрильної пряжі – 32x2 текс. Для здійснення одновісного розтягу зразків трикотажу вздовж лінії петельних рядів застосовано розтяжну рамку. Після закріплення протилежних кінців зразка на голчастій гарнітурі тримачів рамки відстань між ними поступово збільшувалась з інтервалом 20мм. На кожному етапі розтягу виконувалось фотозйомка зразків разом із калібрувальною лінійкою. Фотографічні зображення зразків імпортовано у програмне середовище Autodesk AutoCAD. Після калібрування для кожного стану розтягу зразка визначено такі показники як: середнє значення ширини рапорту, середнє значення ширини опуклої частини рапорту, а також видимої ділянки його увігнутої частини. Дослідження показало, що на перших етапах розтягу відбувається взаємний зсув ділянок рапорту, що належать різним шарам трикотажу та зменшення закручуваності ділянок гладі. Подальше прикладання зусилля розтягу призводить до більш рівномірного деформування досліджуваних структурних частин рапорту.

Наукова новизна. Експериментально визначено характер зміни геометричних характеристик трикотажу ластичних переплетень різних рапортів, виготовлених з різних видів сировини.

Практичне значення. Отримані у ході дослідження характеристики трикотажу використано для формування бази даних, необхідної для побудови тривимірних моделей трикотажу переплетення ластик з бамбукової, вовняної, напіввовняної, та поліакрилонітрильної пряжі.

Ключові слова: трикотаж ластичних переплетень, деформація одновісного розтягу, нитка.

Вступ. Структура трикотажу як топологічного утворення з ниток забезпечує широкий спектр технологічних та конструктивних можливостей надання функціональних властивостей полотнам та виробам побутового, спортивного та іншого спеціального призначення. Головною причиною популярності трикотажу є його еластичність та формостійкість, які в значній мірі визначаються структурою переплетень, видом сировини, параметрами режимів в'язання, що розширює можливості вибору дизайнерських рішень.

Розтяг трикотажного полотна визначається зміною його розмірів під дією прикладеного навантаження. У процесі розтягу відбуваються зміни геометрії поверхні трикотажу, причому характер перерозподілу волокнистого матеріалу ниток в структурі полотна проявляється по-різному для різних видів сировини та кількості петель у рапорті кулірного трикотажу ластичних переплетень.

Постановка завдання. Опис структури трикотажу в умовно-рівноважному та деформованому стані розглянуто у роботах О.І. Коблякова, О.С. Далідовича, І.І. Шалова, Л.О. Кудрявіна. Однак теоретичні дослідження минулого сторіччя більше були спрямовані на вивчення граничних механічних навантажень, ніж на умови збереження відчуття комфорту

під час експлуатації виробу. Робота [2] присвячена вивченню вимог до спортивного трикотажу з точки зору забезпечення розтяжності на окремих ділянках тіла під час виконання певних рухів та відповідності трикотажних полотен з еластаном заданим вимогам. Параметри в'язання впливають як на повну деформацію трикотажу з вмістом еластомерних ниток, так і на її частини [3]. Механічні властивості трикотажу залежать від глибини кулірування та лінійної густини ниток. Чим більше частка швидкооборотної та повільнооборотної складових у повній деформації трикотажу, тим краще виріб з такого матеріалу зберігає свої лінійні розміри та надану в процесі виготовлення форму [3]. Для спортивних виробів прилеглого силуету це першочерговий фактор, на який потрібно найбільше звертати уваги при проектуванні. Залишкова деформація, навпаки, призводить до швидкої зміни розмірів та псування форми виробу в процесі експлуатації, що знижує якість безшовних спортивних виробів. Показники закручуваності та розтяжності трикотажу ластичних переплетень розглянуто у роботах [4, 5]. У роботі [6] розглянуто зміни будови та властивостей ластичних переплетень при різних комбінаціях розстановки голок. Дослідження зміни параметрів трикотажного полотна при різних ступенях розтягу розглянуто в роботі [7]. Ластичні полотна при певному розтязі збільшують свою ширину, але це не призводить до зменшення довжини полотна при низьких одновісних навантаженнях [7]. Вивчення змін, які відбуваються у структурі трикотажу в процесі деформування набуває особливого значення у контексті створення тривимірних моделей, придатних для використання у віртуальних експериментах [8, 9]. В залежності від мети та характеру запланованих чисельних експериментів можуть бути обрані алгоритми побудови мезомodelей трикотажу (modelей з деталізацією структури на рівні ниток, або навіть волокон), алгоритми створення макромodelей, де трикотаж подається у вигляді твердотільної просторової оболонки, або багаторівневого проектування, яке передбачає використання modelей мезо- та макрорівня на різних етапах проектування [9, 12]. Ластичне переплетення (ластик) є подвійним переплетенням, у якому з обох сторін відповідно до рапорту чергуються лицьові та виворітні стовпчики. Таке переплетення виробляють з різним поєднанням лицьових та виворітних петельних стовпчиків, яке залежить від розміщення робочих голок в окремих голечницях. Це забезпечує можливість отримання різноманітних художніх ефектів та необхідних споживних характеристик трикотажу [10, 11].

Порівняно з гладдю ластик має підвищену розтяжність по ширині (вздовж петельного ряду). Саме тому його рекомендують використовувати в тих виробках, що повинні мати більшу розтяжність за шириною і меншу за довжиною. Трикотажні вироби спортивного призначення повинні витримувати в процесі експлуатації велику кількість різноманітних навантажень, забезпечувати термофізіологічний та тактильний комфорт, не обмежувати рухи людини. Для виготовлення спортивного трикотажу використовують різні види сировини. Використання високорозтяжних еластомерних ниток при виготовленні спортивного трикотажу забезпечує високу пружність та підвищує компресійні властивості матеріалів. З іншого боку, підвищені показники розтяжності без зайвої компресії можуть бути надані матеріалам за рахунок використання ластичних переплетень, але у виробничих умовах деформаційні властивості таких матеріалів здебільшого оцінюють на підставі професійного досвіду людини-проектувальника. З метою отримання даних для моделювання фізико-механічних властивостей трикотажу ластичних переплетень у середовищі сучасних програмно-

аналітичних комплексів, необхідно вивчити характер перерозподілу нитки у трикотажі ластичних переплетень різних рапортів з бамбукової, напіввовняної, вовняної та поліакрилонітрильної (ПАН) пряжі у процесі одновісного розтягнення вздовж лінії петельного ряду.

Результати досліджень. У ході дослідження на плоскофанговій машині ПВРК 10-го класу вироблено зразки трикотажу переплетення ластик з рапортом 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 та 6x6. У якості сировини використано бамбукову пряжу лінійної густини 29x2 текс, напіввовняну пряжу - 31x2 текс, вовняну та поліакрилонітрильну пряжу – 32x2 текс. На першому етапі дослідження визначено параметри структури трикотажу за стандартизованою методикою, значення ширини та товщини кожного зразка в рівноважному стані. Для проведення експерименту обрано розтяжну рамку (рис.1) для визначення 5-ти етапів одновісного розтягнення трикотажу. Перед проведенням вимірів на всіх зразках позначено контрольні точки.

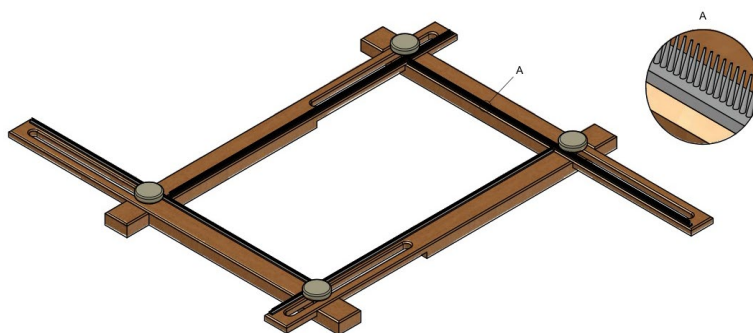


Рис. 1. Розтяжна рамка

Зразки закріплювались на тримачах рамки та поступово розтягувались вздовж петельного ряду з інтервалом 2 см. У кожному зі станів розтягу Т1-Т5 виконувалась фотозйомка зразків разом із калібрувальною лінійкою (рис.2) Перед розтягом усі зразки фотографували в умовно-рівноважному стані, та після кожного розтягу на величину +2 см, 5 разів, до максимального розтягу +10 см.

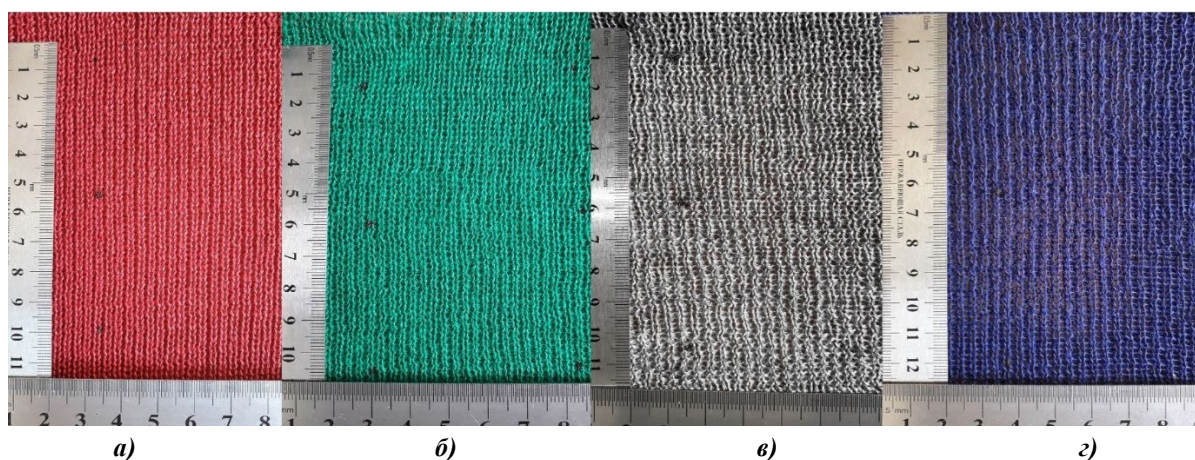


Рис. 2. Фотографічні зображення зразків трикотажу ластик 1+1 з бамбукової (а), ПАН (б), напіввовняної (в) та вовняної (г) пряжі

Отримані фотографічні зображення зразків кожного з 5-ти етапів деформації розтягу відкалібровано у програмному середовищі AutoCAD. В залежності від властивостей сировини і особливостей процесу петлетворення у трикотажі переплетення ластик можуть бути перекося петельних стовпчиків, нахил петельних рядів, а також різний нахил остовів петель у петельних стовпчиках. Оскільки стандартні методики дослідження геометричних характеристик структури трикотажу не передбачають отримання всієї інформації, необхідної для побудови моделей зразків у програмному середовищі, у ході дослідження прийнято рішення використовувати методику дослідження геометрії поверхні трикотажу ластичних переплетень, описану у роботах [8,13] з визначенням таких параметрів як: середні значення ширини рапорту ($Ш_p$, мм), опуклої (C , мм) та видимої ділянки увігнутої (s , мм) частини рапорту, а також відносне видовження зразка (рис. 3).

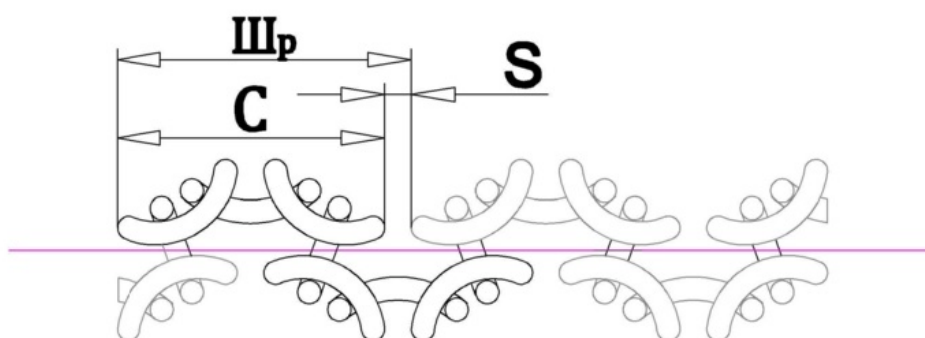


Рис. 3. Ширина рапорту та його складових частин в умовно-рівноважному стані, де $Ш_p$ - ширина рапорту, C - ширина опуклої ділянки рапорту, S – ширина проекції на площину полотна увігнутої частини рапорту

Після калібрування для кожного стану розтягу зразка визначено середнє значення ширини рапорту ($Ш_p$, мм), середнє значення ширини опуклої (C , мм) та видимої ділянки увігнутої (s , мм) частини рапорту, а також відносне видовження зразка.



Рис. 4. Зміна геометрії поверхні трикотажу переплетення ластик 3+3 з бамбукової сировини у процесі розтягу вздовж петельного ряду

Результати дослідження показали, що при поступовому збільшенні значення відносної деформації на 20, 40, 60 та 80% відповідно, спочатку ширина опуклої частини рапорту залишається незмінною, а відстань між опуклими частинами суміжних рапортів вздовж лінії петельного ряду поступово збільшується. При цьому висота петельного ряду майже не зменшується. Діаграми, що показують процес зміни ширини ділянок рапорту C й s , та ширини рапорту $Шр$ (значення по осі y , мм) для кожного зі станів розтягу T1-T5 (значення по осі x) наведено на рис. 5.

Для зразків, що знаходяться в умовно-рівноважному стані, збільшення кількості петельних стовпчиків у рапорті не завжди пов'язане зі збільшенням значення його ширини ($Шр$, мм). Якщо ширина рапорту переплетення ластик 2+2 практично для всіх видів сировини перевищує значення ширини рапорту переплетення ластик 1+1, то для переплетення ластик 3+3 вона буде меншою від аналогічного показника переплетення ластик 2+2 в межах одного виду сировини для зразків з бамбука, вовни та напіввовни, але більшою для зразків з ПАН пряжі. Ширина рапорту ластика 4+4 з бамбукової пряжі більша від ширини рапорту ластика 3+3, але все ще менша від аналогічного показника переплетення ластик 2+2. Ширина рапорту переплетення ластик 4+4 з ПАН пряжі є більшою від рапорту 2+2 та меншою від ширини рапорту переплетення ластик 3+3. Ластики більших рапортів, таких як 5+5 та 6+6 для всіх видів сировини характеризуються більшими показниками ширини рапорту. Це можна пояснити тим, що для рапортів 3+3 та 4+4 сили пружності нитки, що сприяють закручуваності ділянок гладі, є достатніми для утримання їх у більш щільному положенні. Зі збільшенням рапорту частка цих складових у загальній структурі внутрішніх сил зменшується, а вага волокнистого матеріалу нитки, що припадає на кожен ділянку рапорту та значення ширини рапорту збільшується.

Завдяки врівноваженій структурі розтяг трикотажу ластичних переплетень з однаковою кількістю лицьових та виворітних петель у рапорті переплетення відбувається з обох сторін однаково. Однак на перших етапах розтягу збільшення ширини відбувається за рахунок зміни взаємного положення елементів рапорту, що належать різним шарам трикотажу, далі відбувається зменшення закручуваності ділянок гладі. У межах розглянутих навантажень перерозподілу нитки в петлях не відбувається. Адже такий перерозподіл з розпрямленням нитки у платинних та голкових дугах петлі починається на стадіях розтягу, близьких до розривних, що практично не спостерігаються під час експлуатації виробів спортивного призначення.

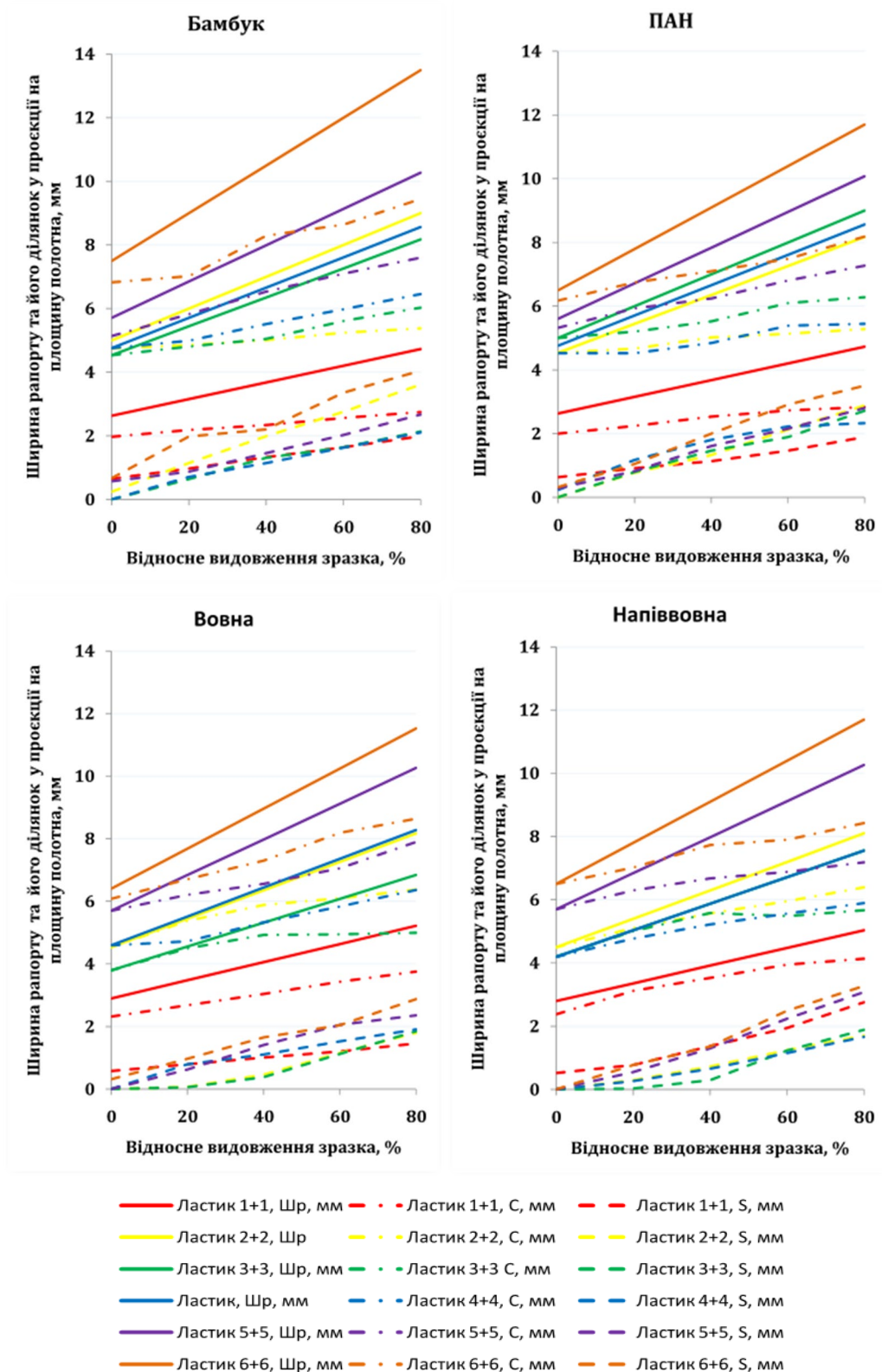


Рис. 5. Збільшення ширини ділянок рапорту у процесі розтягу

Висновок: У ході дослідження проаналізовано характер зміни геометричних параметрів трикотажу переплетення ластик різних рапортів. Встановлено, що у процесі збільшення ширини у межах від 0 до 80% відбуваються такі зміни геометрії поверхні

трикотажу як зменшення кривизни платинних та голкових дуг, зменшення величини взаємного заходу ділянок рапорту, що належать різним шарам трикотажу та зменшення закручуваності ділянок гладі. Перерозподіл нитки між точками контакту відбувається на більш пізніх стадіях розтягу, які планується вивчити у ході подальших досліджень. Виявлено нерівномірність перерозподілу нитки під час одновісної деформації розтягу по ширині зразка трикотажу в окремих контрольних точках. Встановлено, що на перших етапах розтягу збільшення ширини відбувається в основному за рахунок взаємного зсуву ділянок різних шарів трикотажу, тобто відбувається ліквідація заходу петель виворотного шару за лицьові. Але при подальшому прикладенні розтягуючих зусиль збільшення ширини рапорту відбувається рівномірно. Причому чим більший розмір рапорту ластика, тим на більш ранньому етапі розтягу розпочинається рівномірне збільшення ширини опуклих та ввігнутих ділянок переплетення гладь як складових переплетення ластик.

Література

1. Кудрявин Л.А., Шалов И.И. Основы технологии трикотажного производства: Учеб. пособие для вузов. М.: Легпромбытиздат, 1991. 496 с.
2. Bardos de Vasconcelos F., Casaca F., Gomes de Vasconcelos F., Marcicano J., Sanches R. Design of elastic garments for sports in circular knitting. *International Journal of textile and Fashion Technology (IJTFT)*, Vol.3, Issue 1, Mar 2013, p.39-48.
3. Кизимчук О. П. Використання армованих еластомерних ниток фірми GUMEX у плосков'язальному виробництві / О. П. Кизимчук, Л. М. Мельник // *Технології та дизайн*. - 2013. - № 2 (7)
4. Loginov, A., Grishanov, S. and Harwood, R. (2002a), Modelling the load-extension behavior of plain-knitted fabric. Part I: A unit-cell approach towards knitted-fabric mechanics, *Jornal of the Textile Institute*, 93 (Part 1, No. 3), 218 38.
5. 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.
6. Гаджиев Д.А. О некоторых особенностях строения производных ластичных переплетений / Гаджиев Д.А. // *Технология текстильной промышленности*. – 2012. - №5 (341)
7. Charalambus A., Priniotakis G., Pavlova M., Study of the phase changes in the structure of single plated elastomeric fabric garments / department of Textile Engineering T.E.I. of Piraeus Greece // *Sliven College Technical University Sofia Bulgaria*.

References

1. Kudryavin L.A., Shalov I.I. (1991). *Osnovy tekhnologii trikotazhnogo proizvodstva* [Fundamentals of knitting technology]. М.: Legprombytizdat [in Russian].
2. Bardos de Vasconcelos F., Casaca F., Gomes de Vasconcelos F., Marcicano J., Sanches R. Design of elastic garments for sports in circular knitting./ *International Journal of textile and Fashion Technology (IJTFT)*, Vol.3, Issue 1, Mar 2013, p.39-48. [in English].
3. Kyzymchyk O.P. L.M. Melnik (2013). Vukorustania armovanuh elastomernuh nutok firmu GUMEX u ploskovazalnomy vurobnutstvi [Tensility of lasting 1+1 weave knitted fabric made of reinforced elastomer threads of "GUMEX"]. *Tehnologi ta duzayn. - Technology and design*, Vol. 2 (7) [in Ukrainian].
4. Loginov, A., Grishanov, S. and Harwood, R. (2002a), Modelling the load-extension behavior of plain-knitted fabric. Part I: A unit-cell approach towards knitted-fabric mechanics, *Jornal of the Textile Institute*, 93 (Part 1, No. 3), 218 38. [in English].
5. 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. [in English].
6. Gadzhiev D.A. (2012). O nekotorykh osobennostyakh stroyeniya proizvodnykh lastichnykh perepleteni [On some features of the structure of rib interlacings derivatives]. *Textile industry technology, - Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 5(341) [in Russian].
7. Charalambus A., Priniotakis G., Pavlova M., Study of the phase changes in the structure of single plated elastomeric fabric garments / department of Textile Engineering T.E.I. of Piraeus Greece // *Sliven College Technical University Sofia Bulgaria*.
8. Yelina T.V., Halavska L.Ye, Manoilenko O.P., (2019). Stvorenniya parametrychnoyi modeli poverkhni trykotazhu perepletennya lastyk 2+2 [Development of a

8. Єліна Т.В., Створення параметричної моделі поверхні трикотажу переплетення ластик 2+2/ Єліна Т.В., Галавська Л.Є., Манойленко О.П., - // Вісник КНУТД. – 2019, №2 (132). - С 80-89
9. Галавська Л. Є. Використання комп'ютерних тривимірних геометричних моделей петельної структури трикотажу у віртуальних експериментах / Л. Є. Галавська, Т. В. Єліна // Вісник КНУТД. - 2015. - № 2 (84): Серія "Технічні науки". - С. 94-103.
10. Король В. П. Основи теорії в'язання візерункового трикотажу: підручник / В. П. Король, Л. Є. Галавська. – К.: Кафедра, 2014. – 498 с.
11. Молина С.П. Разработка математических моделей для описания взаимосвязи деформаций и напряжений при растяжении трикотажа / дис. канд. техн. наук: 05.19.01, - Благовещенск, 1996
12. Єліна Т.В. Моделювання процесу одноосної деформації трикотажу переплетення ластик різних рапортів. / Т.В. Єліна, Л.Є. Галавська, В.І. Безсмертна // Матеріали конференції СТПК-2020. – С. 196-198.
13. Єліна Т.В. Вивчення процесу одноосної деформації трикотажу переплетення ластик 2+2 під дією розтягуючого зусилля / Г.В. Зубрицька, Т.В. Єліна, Л.Є. Галавська // Вісник ХНУ №3(285). 2020. – С. 222-226.

- parametric surface model of rib 2x2 knits]. Visnyk KNYTD, 2 (132) [in Ukrainian].
9. Halavska L.Ye., Yelina T.V. (2015). Vykorystannya komp'yuternykh tryvymirnykh heometrychnykh modeley petel'noyi struktury trykotazhu u virtual'nykh eksperymentakh [Using of computer 3D geometric models of the knitted structures knitwear for virtual simulations] - Visnyk KNYTD, Vol. 2 (84), 94-103 [in Ukrainian].
10. Korol' V. P., (2014). Osnovy teorii v'yazannya vizerunkovoho trykotazhu [Basic theory of patterned of knitwear knitting: a textbook]. Kyiv [in Ukrainian].
11. Molina S.P. (1996). Rozrobka matematychnykh modeley dlya opysu vzyemozv'yazku deformatsiy i napruzen' pry roztyahuvanni trykotazhu [Development of mathematical models for describing the interconnection of deformations and straight lines in the growing knitwear]. Blahovyeshchens'k, [in Russian].
12. Yelina T.V., Halavska L.Ye., Bessmertnaya V.I. (2020). Modelirovaniye protsesa odnoosnoy deformatsii trikotazha perepleteniya lastik razlichnykh raportov [Modeling of the process of uniaxial deformation of knitwear, weaving eraser of new reports]. STPK, 196-198 [in Ukrainian].
13. Yelina T.V., Zubritskaya, G.V., Galavs'ka L.Ye. (2020). Vyvchennya protsesu odnovisnoyi deformatsiyi trykotazhnoho v'yazal'noho lastyku 2 + 2 pid diyeyu roztyahuvannya [Study of the process of uniaxial deformation of the knitwear weave eraser 2 + 2 under the action of tensile force]. Vestnik KHNU, 3 (285), 222-226. [in Ukrainian].

YELINA T. V.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9310-0582>

Scopus Author ID: 57203861122

Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine

PUKHOVA A.

Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine

HALAVSKA L. Ye.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6994-6641>

Scopus Author ID: 57191413261

Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine

ROMANIUK V.

Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine

ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ТРИКОТАЖА ПЕРЕПЛЕТЕНИЯ ЛАСТИК РАЗЛИЧНЫХ РАПОРТОВ

ЕЛИНА Т.В., ГАЛАВСКАЯ Л.Е., ПУХОВАЯ А.В. РОМАНЮК В.П.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Изучение процесса деформирования трикотажа ластичных переплетений, происходящего в результате приложения растягивающих усилий в направлении петельных рядов.

Методы исследований. В ходе работы использованы методы теоретического анализа, фотокамера, растяжная рамка, программное обеспечение Microsoft Excel и Autodesk AutoCAD.

Результаты исследований. Для изготовления образцов трикотажа ластичных переплетений использовалась плоскофанговая машина ПВРК 10-го класса. Образцы трикотажа произведены переплетением ластик с рапортом 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 и 6x6 из бамбуковой пряжи линейной плотности 29x2 текс, шерстяной пряжи 32x2 текс, полушерстяной пряжи 31x2 текс и

Полиакрилонитрильные пряжи 32x2 текс. Для осуществления одноосного растяжения образцов трикотажа вдоль линии петельных рядов использовалась растяжная рамка. После закрепления противоположных концов образца на игольчатой гарнитуре держателей рамки расстояние между ними постепенно увеличивалось с интервалом 20мм. На каждом этапе растяжения выполнялась фотосъемка образцов вместе с калибровочной линейкой. Фотографии образцов импортированы в программную среду Autodesk AutoCAD. После калибровки для каждого состояния растяжения образца определены такие показатели как: среднее значение ширины рапорта, среднее значение ширины выпуклой части рапорта, а также видимого участка его вогнутой части. Исследование показало, что на первых этапах растяжения происходит взаимное смещение участков рапорта, принадлежащих разным слоям трикотажа и уменьшение скручиваемости участков глади. Дальнейшее приложения усилия растяжения приводит к более равномерному деформированию исследуемых структурных частей рапорта.

Научная новизна. Экспериментально определен характер изменения геометрических характеристик трикотажа ластичных переплетений различных рапортов, изготовленных из различных видов сырья.

Практическое значение. Полученные в ходе исследования характеристики трикотажа использовано для формирования базы данных, необходимой для построения трехмерных моделей трикотажа переплетения ластик с бамбуковой, шерстяной, полушерстяной, и Полиакрилонитрильные пряжи.

Ключевые слова: трикотаж ластичных переплетений, деформация одноосного растяжения, нить.

STUDY OF THE PROCESS OF STRETCHING IN THE COURSEWISE DIRECTION OF DIFFERENT KNITTING RIB STRUCTURES

YELINA T.V., HALAVSKA L.YE., PUKHOVA A.V., ROMANIUK V.P.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Study of the process of deformation of rib knits, which occurs due to the application of tensile forces in the course direction.

Methodology. During the study, methods of theoretical analysis, a camera, a stretching frame, Microsoft Excel software and Autodesk AutoCAD were used.

Findings. For producing rib knit samples, a 10th class flat-bed knitting machine PVRK was used. Samples of knitwear were made with repeatable unit patterns of 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 and 6x6 from bamboo yarn of linear density 29x2 tex, woolen yarn 32x2 tex, half-woolen yarn 31x2 tex and Polyacrylonitrile yarn 32x2 tex. To carry out uniaxial stretching of knitted fabric samples along the line of stitch rows, a stretching frame was used. After fixing the opposite ends of the sample on the needle set of the frame holders, the distance between them gradually increased with an interval of 20 mm. At each stage of stretching, the samples were photographed together with a calibration ruler. Sample photos imported into Autodesk AutoCAD software. After calibration, for each state of stretching of the sample, such characteristics were determined as: the average value of the width of the repeatable unit pattern, the average value of the width of the convex part of the pattern, as well as the visible section of its concave part. The study showed that at the first stages of stretching, there is a mutual displacement of the sections of the pattern, belonging to different layers of knitwear and a decrease in the twisting of the sections of the smooth surface. Further application of the tensile force leads to a more uniform deformation of the investigated structural parts of the pattern.

Scientific novelty. The change in the geometric characteristics of rib knits with various repeatable units patterns made from various types of raw materials is experimentally determined.

Practical value. The characteristics of knitwear, obtained in the course of the study, were used to form a database necessary for the construction of three-dimensional models of rib knits with bamboo, woolen, semi-woolen, and polyacrylonitrile yarns.

Keywords: knitted rib structures, tensile deformation, yarn.

УДК 541.64:
539.2:537.5

ЩЕНКО О.В., ПЛАВАН В.П., ЛЯШОК І.О., ШЕВЧУК Т.В.,
ПАТРИХІНА З.С.

Київський національний університет технологій та дизайну

ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ УЛЬТРАТОНКИХ НЕТКАНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ З ХІТОЗАНОМ

Мета. Метою наукової роботи є розробка технології одержання ультратонких нетканних матеріалів на основі полімерної композиції полівінілового спирту та полівінілацетату з додаванням хітозану, який розчиняли у молочній та оцтовій кислотах.

Методика. Для оцінки характеристик композицій визначали в'язкість та поверхневий натяг робочих розчинів методом капілярної віскозиметрії, електропровідність - кондуктометричним методом. Вплив термостабілізації матеріалів з додаванням хітозану досліджували, використовуючи їх сорбційні властивості. Морфологічний склад ультратонких нетканних матеріалів досліджено методом електронної скануючої мікроскопії.

Результати. Розроблено технологію одержання ультратонких матеріалів з хітозаном, розчиненим у молочній та оцтовій кислотах, методом електроформування. Визначено параметри отримання волокон з досліджуваних композицій. В результаті аналізу отриманих ультратонких нетканних матеріалів методом електронної мікроскопії встановлено, що при напрузі між електродами 30 кВ отримуються волокна з діаметром від 0,3 до 0,9 мкм. За статистичним розподілом діаметрів полімерних волокон в ультратонких нетканних матеріалах визначено, що в залежності від складу композиції, діаметр 0,3 мкм мають 72-77 % волокон.

Наукова новизна роботи полягає у визначенні основних закономірностей процесу електроформування з використанням природного полімеру хітозану та особливостей підготовки його розчинів в молочній та оцтовій кислотах. Встановлено вплив в'язкості, поверхневого натягу та електропровідності робочих розчинів композицій на процес електроформування.

Практичне значення. Розроблено технологічні параметри одержання ультратонких нетканних матеріалів на основі композиції полівінілового спирту та полівінілацетату з додаванням хітозану, методом електроформування, визначено можливість регулювання діаметру волокон через вибір розчинника хітозану.

Ключові слова: ультратонкі неткані матеріали, полівініловий спирт, полівінілацетат, хітозан, електроформування, молочна кислота, оцтова кислота, діаметр волокон.

Вступ. В останні роки в галузі охорони здоров'я спостерігається заміна традиційних бавовняних матеріалів багаторазового використання на одноразові з різних видів нетканних матеріалів. Вони є основою для виготовлення одноразового медичного одягу і білизни, засобів індивідуального захисту та перев'язувальних матеріалів [1].

Особливий інтерес представляють матеріали з ультратонких волокон у біоінженерії та медицині. Ультратонкі неткані матеріали є перспективними в медицині для створення систем контрольованої доставки лікарських препаратів [2], виготовлення матриць для росту та розширення клітин при регенерації різних тканин живих організмів. Для створення таких нетканних матеріалів використовуються природні полімери: колаген, хітозан, протеїн шовку, фібриноген та їх суміші [3]. Хітозан є хімічно, біологічно та радіаційно стійким, сумісним з різними речовинами – антисептиками, антибіотиками, сульфаніламидами, місцевими анестетиками та ін. Похідні хітозану, завдяки наявності ряду функціональних груп (гідроксильних, аміно-, ацетиламідних та ін.), характеризуються високими сорбційними властивостями [4].

Велика кількість вільних аміногруп модифікованого хітозану обумовлює його комплексотворні та іонообмінні властивості за рахунок зв'язування протонів та утворення надлишкового позитивного заряду.

На основі ультратонких волокон із біосумісних та біодеградуємих полімерів таких як хітозан, одержують перев'язувальні засоби для опікових поверхонь, ран, які довго не загоюються та трофічних виразок. Використання таких матеріалів дозволяє прискорити регенерацію шкіряного покриву, демонструє антимікробний захист, високу повітро- та паропроникність [5].

Одним з методів одержання ультратонких нетканних матеріалів є електроформування з розплаву або розчину полімерів з характерними значеннями в'язкості і поверхневого натягу. За апаратурним оформленням і характером технологічного процесу електроформування волокон відноситься до сухого безфільєрного методу. Деформація вихідного полімерного розчину здійснюються електричними силами в єдиному робочому просторі, з наступним утворенням волокон після випаровування розчинника та формуванням волокнистого шару [6].

Суттєвим недоліком є обмежене практичне використання нетканних матеріалів на основі водорозчинних полімерів. Для одержання нерозчинних волокон на основі суміші хітозан - полівініловий спирт проводять додаткову операцію – термообробку при температурі 115-120 °С протягом 3 годин [7,8].

Тому актуальним завданням є розробка технології виготовлення нетканних ультратонких матеріалів з підвищеною стійкістю до водних розчинів.

Постановка завдання. Метою наукової роботи є розробка технології одержання ультратонких нетканних матеріалів на основі полімерної композиції полівінілового спирту та полівінілацетату з додаванням хітозану, який розчиняли у молочній та оцтовій кислотах.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі: дослідити вплив в'язкості, поверхневого натягу, електропровідності розчинів композицій на основі хітозану, який розчиняли у молочній та оцтовій кислотах, на процес електроформування; визначити склад композиції для отримання ультратонких нетканних матеріалів; дослідити вплив термостабілізації на сорбційні властивості нетканних матеріалів; дослідити зразки нетканних матеріалів з використанням оптичної мікроскопії та подальшим статистичним аналізом діаметрів волокон.

Методологія досліджень. Для одержання нетканних матеріалів використовували хітозан (CAS № 9012-76-4). Для покращення волокноутворюючих властивостей в розчин хітозану (Хт) додавали полівініловий спирт (ПВС марки 16/1 масова частка ацетатних груп, не більше 0,9-1,7%) та полівінілацетат ПВА (CAS № 9003-20-7). Як розчинник використовували водні розчини молочної (МК) (60 %-вий, CAS № 50-21-5) та оцтової (ОК) (40 %-вий, CAS 64-19-7) кислот.

Готували 2,0 % розчин хітозану у 1 % молочної кислоті, 6,0 % розчин хітозану у 70 % оцтової кислоті та окремо 5 % водний колоїдний розчин ПВС. Композиції готували при нагріванні на водяній бані при постійному перемішуванні. Досліджували композиції у співвідношенні ПВС/Хт в молочної кислоті (1:1), (3:1), (4:1); ПВС/Хт в оцтової кислоті (5:1); ПВА/Хт в молочної кислоті (4:1), (3:2); ПВА/Хт в оцтової кислоті, (4:1) (3:1) (5:1), з додаванням I₂ (3:1)

Ультратонкі неткані матеріали отримували методом електроформування на лабораторній установці капілярного типу з напруженою електричного поля 30 кВ. Для визначення реологічних характеристик композицій був використаний сталагмометричний метод, діаметр капіляру 0,99 мм. Вплив термостабілізації на сорбційні властивості нетканних матеріалів оцінювали за зміною водопоглинання X (%) та розраховували за формулою (1):

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

де m_2 – маса зразка в певний момент часу перебування у воді, г;

m_1 – маса сухого зразка, г.

Зразки нетканних матеріалів досліджували з використанням електронного скануючого мікроскопу MIRA3 TESCAN та проводили вимірювання поперечних розмірів волокон за методом аналізу отриманих цифрових зображень в програмному пакеті ImageJ [9] з наступною статистичною обробкою та графічним аналізом отриманих даних в пакеті Statistica [10].

Результати дослідження. Одним з важливих технологічних параметрів стабільного електроформування є відстань між електродами. Це впливає на час дрейфування струменя, випаровування розчинника і напруженість електричного поля. Було досліджено процес волокнуутворення, встановлено відстань між електродами та осаджувальним електродом, стабільність процесу електроформування, а результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Дослідження процесу електроформування композицій на основі хітозану

Зразок	Склад композиції	Відстань від формуючого до осаджуваного електроду, см	Процес формування	Електропровідність κ , См/м
1	ПВС/ХТ (1:1) МК	6-9	-	0,416
2	ПВС/ХТ (3:1) МК	6-8	-	0,282
3	ПВС/ХТ (4:1) МК	8	+	1,228
4	ПВС/ХТ (5:1) ОК	6	+	1,515
5	ПВА/ХТ (3:1) ОК, I ₂	7	+	2,015
6	ПВА/ХТ (3:1) ОК	6,5-9	-	2,875
7	ПВА/ХТ (4:1) ОК	6,5-9,5	-	0,275
8	ПВА/ХТ (3:2) МК	7	+/-	0,434
9	ПВА/ХТ (4:1) МК	9	+	0,568

- «-» - формування не відбувається, розчин занадто рідкий;
- «±» - формування нестабільне;
- «+» - формування волокон проходить стабільно.

За результатами досліджень встановили, що стабільне електроформування відбувається для зразків ПВС/ХТ (4:1) МК, ПВС/ХТ (5:1) ОК, ПВА/ХТ ОК (3:1) з I₂, ПВА/ХТ (4:1) МК, тому в роботі були досліджені властивості розчинів композицій та неткані матеріали на основі саме цих рецептур.

Встановлено, що електроформування відбувається при відстані між електродами в межах 6-9 см, вона змінюється в залежності від рецептурного складу зразків.

Коефіцієнт поверхневого натягу впливає на властивості прядильного розчину та визначає корисні затрати електричної енергії, яку підводять до формуючого капіляру. Чим нижче коефіцієнт поверхневого натягу розчину, тим стабільніше відбувається процес електроформування. Для зменшення поверхневого натягу формуючого розчину додають співрозчинники, які мають нижчі значення поверхневого натягу, а також поверхнево-активні речовини [11]. Тому при зниженні коефіцієнту поверхневого натягу формуючого розчину, можна зменшити величину електричної напруги на капілярі. За даними [12] допустимим значенням є величина коефіцієнта поверхневого натягу менше 0,05 Н/м.

Наступною важливою властивістю формуючого розчину є його в'язкість. На першій стадії електроформування в'язкість є небажаним фактором, що призводить до збільшення енергії на подолання внутрішнього тертя в рідкому струмені. Разом з цим, при підвищенні в'язкості гасяться капілярні хвилі, які руйнують струмінь, що покращує продуктивність та якість нетканого матеріалу.

Електропровідність впливає на процес електроформування волокноутворюючого розчину. Мінімальне значення даного показника визначається часом релаксації в розчині вільних електричних зарядів під дією зовнішнього електричного поля. Підвищення електропровідності прядильного розчину дозволяє збільшити швидкість процесу електроформування.

При дослідженні процесу електроформування, спробували поєднати отримані практичні результати електропровідності, в'язкості та поверхневого натягу розчинів та розраховували напруження електричного поля для всіх зразків (Табл.2). Для розрахунків використовували спрощену формулу, з припущенням, що вся електроенергія витрачається на подолання в'язкості та поверхневого натягу краплі полімерного розчину. Напруження електричного поля (E_c) визначається за формулою (2):

$$E_c = 4 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \eta \cdot \kappa}{\varepsilon}} \quad (2)$$

де η – в'язкість волокноутворюючого розчину; ε – діелектрична проникність; κ – електропровідність розчину.

Таблиця 2

Поверхневий натяг, відносна в'язкість розчинів композицій

№ п/п	Зразок	Поверхневий натяг σ , Н/м	Відносна в'язкість $\eta_{\text{від}}$	Напруження поля розрахункове, кВ/см
1	ПВС/ХТ (1:1) МК	0,023	19,8	2,968
2	ПВС/ХТ (3:1) МК	0,062	16,3	2,217
3	ПВС/ХТ (4:1) МК	0,050	54,0	8,421
4	ПВС/ХТ (5:1) ОК	0,047	40,0	8,051
5	ПВА/ХТ (3:1) ОК, I ₂	0,049	43,3	9,660
6	ПВА/ХТ (3:1) ОК	0,019	25,4	8,837
7	ПВА/ХТ (4:1) ОК	0,020	23,8	2,646
8	ПВА/ХТ (3:2) МК	0,070	41,0	4,362
9	ПВА/ХТ (4:1) МК	0,020	45,0	5,228

Враховуючи вплив основних технологічних параметрів та властивостей формуючого розчину на здатність до електроформування встановлено, що при напруженні електричного поля більше 4 кВ/см відбувається витягування струменю та волокнутворення.

Отримані матеріали термостабілізували протягом 1, 2 та 3 годин. Результат дослідження впливу термостабілізації на сорбційні властивості нетканих матеріалів у дистильованій воді наведено на рис.1, 2.

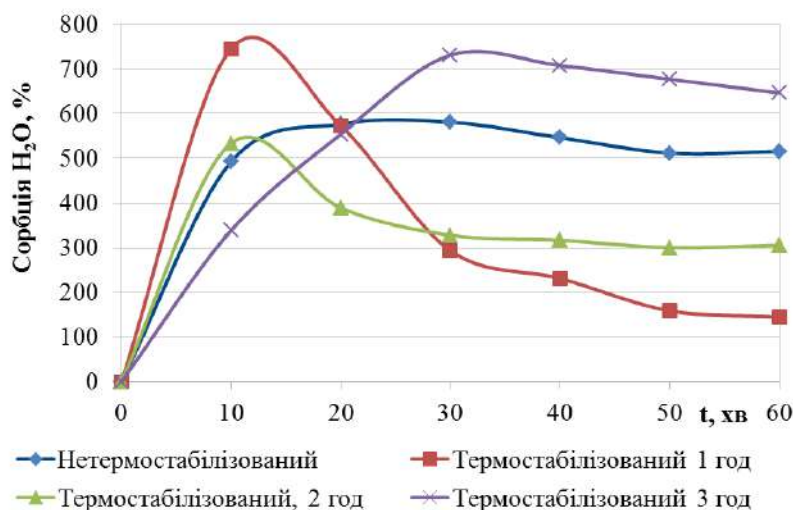


Рис. 1 Вплив термостабілізації на сорбційні властивості матеріалів на основі полівініацетата з хітозаном (4:1), який розчиняли в молочній кислоті

Нетермостабілізований зразок має в межах 10-60 хвилин характерну для зшитих полімерів криву водопоглинання. При термостабілізації 1 та 2 години матеріалів на основі ПВА з хітозаном розчиненим у молочній кислоті спостерігається різке збільшення сорбції до 780 та 550 % відповідно протягом перших 10 хвилин. Далі відбувається процес десорбції води з цих нетканих матеріалів. Продовження обробки підвищеною температурою до 3 годин призводить до зникнення початкового різкого стрибка сорбції. Поглинання води проходить поступово зростаючи до 670 %. Отже для зразків нетканих матеріалів з ПВА/Хт (4:1) МК термостабілізація протягом 3 годин дає можливість отримати зразки з поступовим підвищенням відсотка сорбції протягом першої години дії води.

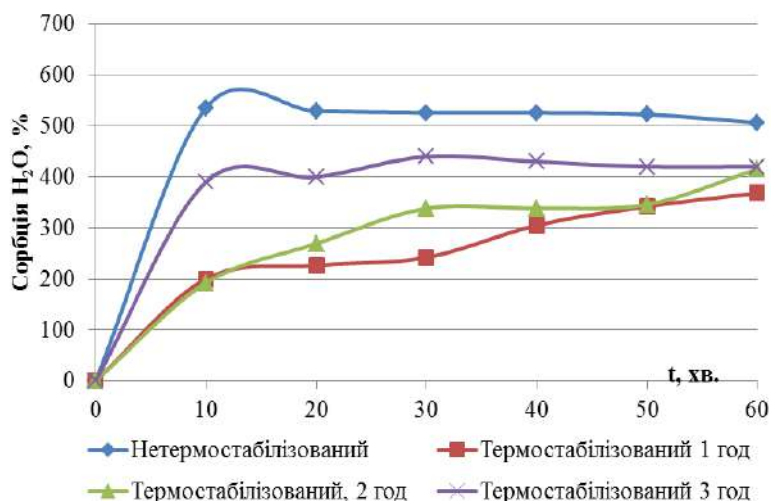
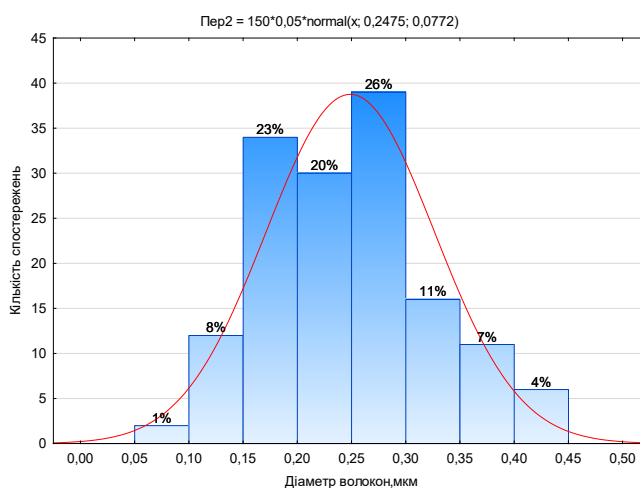
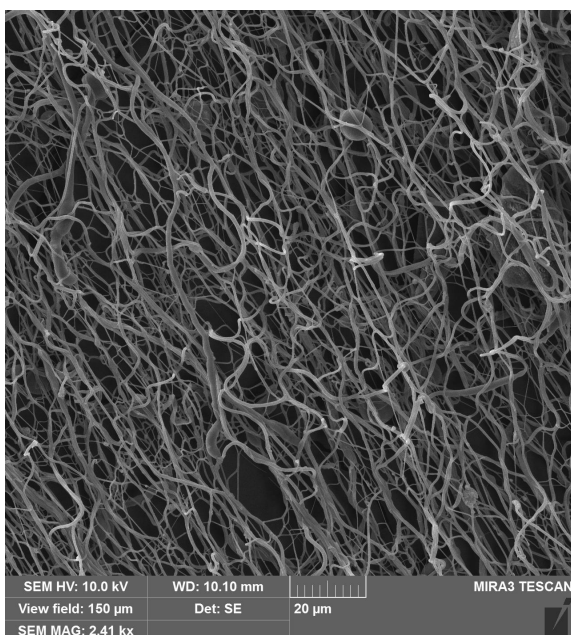


Рис. 2. Вплив термостабілізації на сорбційні властивості матеріалів на основі полівінілового спирту з хітозаном (4:1), який розчиняли в молочній кислоті

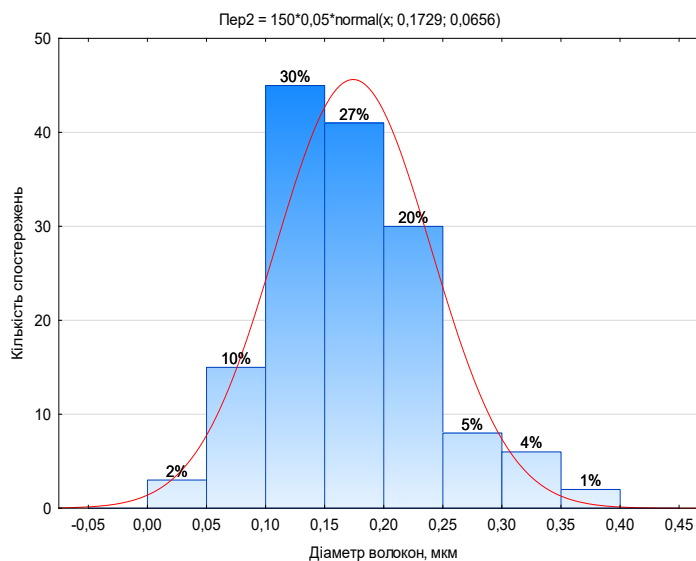
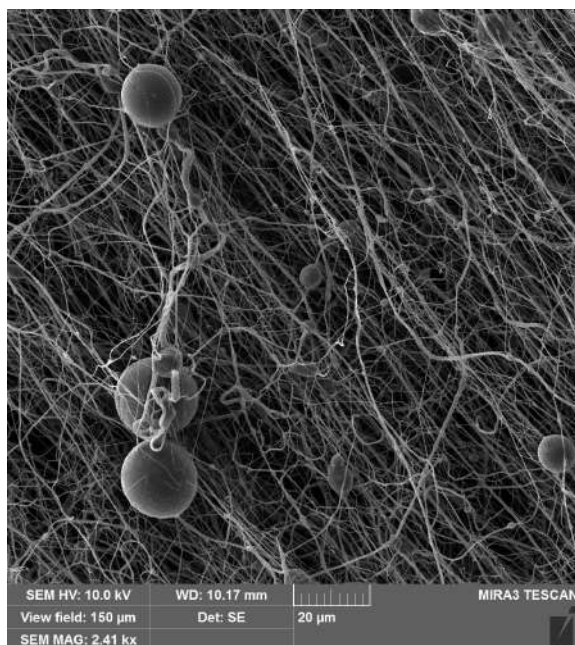
Неткані матеріали на основі ПВС з хітозаном розчиненим в молочній кислоті, які не піддавали дії підвищеної температури, проявляють аналогічний нетермостабілізованам зразкам на основі ПВА, характер кривої водопоглинання. Тобто, отримані неткані матеріали з хітозаном, розчиненим у молочній кислоті не залежно від волокноутворюючого полімеру проявляють протягом першої години дії води сорбцію сітчатого полімеру. Термостабілізація протягом 1 години призводить до різкого зниження сорбційної здатності матеріалів протягом першої години дії води, а продовження обробки температурою до 3 годин підвищує сорбцію до 400 %. Отже для нетканних матеріалів з ПВС/Хт (4:1) МК термостабілізація призводить до зниження сорбційної здатності у порівнянні з необробленим зразком на 200-300 %.

Для зразків нетермостабілізованих нетканних матеріалів на основі ПВС з додаванням хітозану розчиненого в оцтовій кислоті характерне збільшення сорбції до 450-600 % протягом перших 10 хвилин з подальшим поступовим зменшенням цих показників. Обробка підвищеною температурою 1-3 години цих зразків призводить до зменшення максимального водопоглинання до значень 100-200 %. Для нетермостабілізованих зразків на основі ПВА з хітозаном розчиненим в оцтовій кислоті максимальна сорбція складає близько 700 % протягом перших 10 хвилин. Подальша обробка водою призводить до зниження цього показника до 600 %. Термостабілізація протягом 1-3 годин знижує максимальну сорбцію до 200 %, але цей показник стає практично стабільним при подальшій дії води. Отже, для зразків нетканних матеріалів на основі ПВА та ПВС /Хт ОК, термостабілізація знижує показник сорбції на 400 % і, разом з тим, покращує стійкість зразка до дії води.

На рисунку 3 наведено мікрофотографії волокон з хітозану, розчиненого в молочній (а) та оцтовій (б) кислотах з додаванням ПВС, отримані на електронному скануючому мікроскопі MIRA3 TESCAN у електронному вакуумі. Структура отриманих матеріалів без помітних дефектів.



a)



б)

Рис. 3 Мікрофотографії нетканого волокнистого матеріалу на основі полівінілової спирт з додаванням хітозану, розчиненого в молочній кислоті (а), та хітозану, розчиненого в оцтовій кислоті (б), отримані методом електронної мікроскопії та діаграми статистичного розподілу діаметрів волокон

Статистичний розподіл діаметрів волокон нетканних матеріалів на основі ПВС з хітозаном показав, що діаметри волокон розподіляються у межах від 0,01 до 0,45 мкм. Встановили, що в залежності від природи кислоти 72% складають волокна з діаметрами від 0,15 до 0,30 мкм для молочної кислоти, та 77% - від 0,10 до 0,25 мкм - для оцтової кислоти.

Дослідження морфологічного складу нетканних матеріалів проводили для зразків ПВС/Хт (4:1) МК; ПВС/Хт (5:1) ОК; ПВА/Хт (3:1) ОК, I₂; ПВА/Хт (4:1) МК. Ширина розподілу діаметрів волокон становить від 0,01 до 0,50 мкм.

Аналіз морфологічного складу нетканних матеріалів, отриманих на основі ПВА з хітозаном розчиненим в молочній та оцтовій кислотах, показав, що діаметри волокон розподіляються у межах від 0,3 до 0,9 мкм. Встановили, що 89% складають волокна з діаметрами від 0,4 до 0,7 мкм для молочної кислоти, та 87% - від 0,45 до 0,55 мкм - для оцтової кислоти.

Одержані методом електроформування неткані матеріали, отримані на основі ПВС та ПВА з додаванням хітозану мають середній діаметр волокон відповідно 0,21 мкм та 0,58 мкм, що відноситься до діапазону ультратонких волокон.

Висновки. В роботі доведено можливість отримання методом електроформування ультратонких нетканних матеріалів на основі полімерних композицій з хітозаном розчиненого у молочній, оцтовій кислотах та волокноутворюючих полімерів ПВА та ПВС.

Встановили, що на характер електроформування впливає ряд рецептурно-технологічних факторів, головними з яких є в'язкість, поверхневий натяг, напруженість електричного поля.

За допомогою спрощеної формули розрахунку напруження електричного поля встановлено можливість прогнозу параметрів в'язкості, поверхневого натягу, електропровідності розчину на стабільність процесу електроформування.

Час термостабілізації змінює сорбційні властивості матеріалів на основі хітозану з різним вмістом ПВС та ПВА, що дає можливість регулювати кінетику вивільнення лікарських препаратів, та регулювати розчинність матеріалів в залежності від терміну експлуатації.

Література

1. Чистенко Г.Н. Нетканые материалы и изделия одноразового применения / Г.Н. Чистенко, О.Л. Таранова, А.Л. Лешкевич, Е.В. Кормилицына, Е.Б. Варивода // Военная медицина, 2011. – №2 (19). – С. 89-91.
2. Sangamesh G. Kumbara, Syam P. Nukavarapua, Roshan Jamesb, MaCalus V. Hogana, Cato T. Laurencin. Recent Patents on Electrospun Biomedical Nanostructures: An Overview // Recent Patents on Biomedical Engineering, – 2008, – №1, – p. 68-78
3. Ramachandran K., Gouma P.I. Electrospinning for bone tissue technique // Recent patents on nanotechnology, – 2008, – №2(1), – p. 1-7
4. Rinaudo M. Chitin and chitosan: properties and applications // Prog. Polym. Sci. –2006. – Vol. 31, № 7. – P. 603-632.
5. Chew S. Y. The effect of the alignment of electrospun fibrous scaffolds on Schwann cell maturation / S. Y. Chew, R. Mi, A. Hoke, K. W. Leong // Biomaterials – 2008, – 29(6),- P. 653-661.
6. Солина А. Н. Получение нановолокнистых материалов на основе хитозана методом электроформования / А. Н. Солина, С. А. Успенский, Г. А. Вихорева и др. // Химические волокна. – 2010. – № 6. – С. 11-17.
7. Duzyer, S., Hockenberger, A., Zussman, E Characterization of solvent-spun polyester nanofibers./ S. Duzyer, A. Hockenberger, E. Zussman // Journal of Applied Polymer Science, – 2011, – Vol. 120(2), P. 759-769.
8. C. Zhang, X.Yuan, L. Wu, Y. Han, J. Sheng Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats. *European Polymer Journal*, – 41 (2005), – 3, – P. 423-432.
9. Perez, J., Pascau, J. Image processing with ImageJ, Packt Publishing Ltd. – 2013. – 140 p.
10. Hill T. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining / T. Hill, P. Lewicki, P.Lewicki // StatSoft Inc., – 2006. – 832 p.
11. J. Zeng Biodegradable electrospun fibers for drug delivery / J. Zeng, X. Xu, X. Chen, Q. Liang, X. Bian, L. Yang, X. Jing, // J. Control. Release. – 2003. – Vol. 92. P. 227-231.
12. Gupta P. Electrospinning of linea homopolymers

References

1. Chystenko, H. N., Taranova, O. L., Leshkevych, A. L., Kormylytsyna, E. V., Varyvoda, E. B. (2011). Netkanye materyaly y yzdelyia odnorazovoho pryumenyia [Nonwovens and disposable products].*Voennaia medytsyna [Military medicine]*, 2(19), 89-91 [in Belarus]
2. Laurencin, C. T., Kumbar, S. G., Nukavarapu, S. P., James, R., Hogan, M. V. (2008). Recent patents on electrospun biomedical nanostructures: an overview. *Recent patents on biomedical engineering*, 1(1), 68-78.
3. Gouma, P. I., Ramachandran, K. (2008). Electrospinning for bone tissue engineering. *Recent patents on nanotechnology*, 2(1), 1-7.
4. Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: properties and applications. *Progress in polymer science*, 31(7), 603-632.
5. Chew, S. Y., Mi, R., Hoke, A., Leong, K. W. (2008). The effect of the alignment of electrospun fibrous scaffolds on Schwann cell maturation.*Biomaterials*, 29(6), 653-661.
6. Sonyna, A. N., Uspenskyi, S. A., Vykhoreva, H. A., Fylatov, Yu. N., Halbraikh, L. S. (2010). Poluchenye nanovoloknystykh materyalov na osnove khytozana metodom elektroformovanyia (obzor) [Obtaining nanofibrous materials based on chitosan by electrospinning]. *Khymycheskye volokna [Chemical fibers]*, (6), 11-17. [in Russian].
7. Duzyer, S., Hockenberger, A., & Zussman, E. (2011). Characterization of solvent-spun polyester nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 120(2), 759-769.
8. Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y., Sheng, J. (2005). Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats. *European polymer journal*, 41(3), 423-432.
9. Pérez, J. M. M., Pascau, J. (2013). *Image processing with ImageJ*. Packt Publishing Ltd.
10. Hill, T., Lewicki, P., Lewicki, P. (2006). *Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining*. StatSoft, Inc..
11. Zeng, J., Xu, X., Chen, X., Liang, Q., Bian, X., Yang, L., Jing, X. (2003). Biodegradable electrospun fibers for drug delivery. *Journal of controlled release*, 92(3), 227-231.
12. Gupta, P., Elkins, C., Long, T. E., Wilkes, G. L.

of poly(methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent/ P. Gupta, C. Elkins, T. E. Long, G. L. Wilkes // Polymer. – 2005. – Vol. 46. – P. 4799-4810.

(2005). Electrospinning of linear homopolymers of poly (methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent. *Polymer*, 46(13), 4799-4810.

ISHCHENKO OLENA

e.ishchenko5@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>

Kyiv National University of Technologies & Design

LIASHOK IRINA

liashok77@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9171-1075>

Kyiv National University of Technologies & Design

PLAVAN VIKTORIIA

plavan.vp@knuutd.com.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: I-5852-2015

Kyiv National University of Technologies & Design

SHEVCHUK TATIANA

tetyana1997.09@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0024-959X>

Kyiv National University of Technologies & Design

PATRYKHINA ZOIA

gosickk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7194-7803>

Kyiv National University of Technologies & Design

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАТОНКИХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ХИТОЗОНОМ

ИЩЕНКО Е.В., ПЛАВАН В.П., ЛЯШОК И.А., ШЕВЧУК Т.В., ПАТРИХИНА З.С.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Целью научной работы является разработка технологии получения ультратонких нетканых материалов на основе полимерной композиции поливинилового спирта и поливинилацетата с добавлением хитозана, который растворяли в молочной и уксусной кислотах.

Методика. Для оценки характеристик композиций определяли вязкость и поверхностное натяжение рабочих растворов методом капиллярной вискозиметрии, электропроводность - кондуктометрическим методом. Исследовали влияние термостабилизации на сорбционные свойства материалов с добавлением хитозаном. Морфологический состав нетканых ультратонких материалов исследовано методом электронной сканирующей микроскопии.

Результаты. Разработана технология получения ультратонких материалов с хитозаном, растворенным в молочной и уксусной кислотах, методом электроформования. Определены параметры получения волокон из исследуемых композиций. В результате анализа полученных ультратонких нетканых материалов методом электронной микроскопии установлено, что при напряжении между электродами 30 кВ получают волокна с диаметром от 0,3 до 0,9 мкм. По статистическому распределению диаметров полимерных волокон в ультратонких нетканых материалах определено, что в зависимости от состава композиции, диаметр 0,3 мкм имеют 72-77% волокон.

Научная новизна работы заключается в определении основных закономерностей процесса электроформования с использованием природного полимера хитозана и особенностей подготовки его растворов в молочной и уксусной кислотах. Установлено влияние вязкости, поверхностного натяжения и электропроводности рабочих растворов композиций на процесс электроформования.

Практическое значение. Разработаны технологические параметры получения ультратонких нетканых материалов на основе композиции поливинилового спирта и поливинилацетата с добавлением хитозана, методом электроформования, определена возможность регулирования диаметра волокон выбором растворителя хитозана.

Ключевые слова: ультратонкие нетканые материалы, поливиниловый спирт, поливинилацетат, хитозан, электроформование, молочная кислота, уксусная кислота, диаметр волокон.

TECHNOLOGY FOR OBTAINING OF ULTRAFINE NONWOVEN MATERIALS BASED ON POLYMER COMPOSITIONS WITH CHITOSAN

ISHCHENKO O. V., PLAVAN V. P., LYASHOK I. O., SHEVCHUK T. V.,
PATRIKHINA Z.S.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. *The aim of the scientific work is to develop a technology for obtaining of ultrafine nonwoven materials based on a polymer composition of polyvinyl alcohol and polyvinyl acetate with the addition of chitosan, which was dissolved in lactic and acetic acids.*

Methodology. *To assess the characteristics of the compositions, the viscosity and surface tension of working solutions were determined by capillary viscometry, and electrical conductivity - by conductometric method. The effect of thermal stabilization of materials based on chitosan was investigated using their sorption properties. The morphological composition of nonwovens was investigated by the method of scanning electron microscopy.*

Findings. *A technology has been developed for the obtaining of ultrafine materials based on chitosan dissolved in lactic and acetic acids by the method of electrospinning. The parameters for obtaining fibers from the studied compositions were determined. As a result of the analysis of the obtained ultrafine nonwoven materials by the method of scanning electron microscopy, it was found that with a voltage between the electrodes of 30 kV, fibers with a diameter of 0.3 to 0.9 μm are obtained. According to the statistical distribution of the diameters of polymer fibers in ultrafine nonwoven materials, it was determined that, depending on the components of the composition, 72-77% of the fibers have a diameter of 0.3 μm .*

Originality. *The scientific novelty of the work lies in the determination of the basic laws of the electrospinning process using the natural polymer of chitosan and the peculiarities of the preparation of its solutions in lactic and acetic acids. The effect of viscosity, surface tension and electrical conductivity of working solutions of the compositions on the process of electrospinning has been established.*

Practical value. *Technological parameters for the obtaining of ultrafine nonwoven materials based on the composition of polyvinyl alcohol and polyvinyl acetate with the addition of chitosan have been developed by the method of electrospinning; the possibility of adjusting the fiber diameter by choosing a chitosan solvent has been determined.*

Keywords: *ultrafine nonwovens, polyvinyl alcohol, polyvinyl acetate, chitosan, electrospinning, lactic acid, acetic acid, fiber diameter.*

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2020.4.11>

УДК544.653.2:
620.194

НИРКОВА Л. І.¹, ГОНЧАРЕНКО Л. В.¹, БОРИСЕНКО Ю. В.²,
ХАРЧЕНКО Ю. О.²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

²Київський національний університет технологій та дизайну

ОСОБЛИВОСТІ ЛОКАЛЬНОЇ КОРОЗІЇ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ Х70, ОБУМОВЛЕНОЇ ЙОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЮ ГЕТЕРОГЕННІСТЮ

Мета. Встановлення впливу хімічного складу і структури на локальну корозію зварного з'єднання трубної сталі Х70 в умовах, що моделюють експлуатаційні, та визначення основних чинників корозії.

Методика. Застосовували стандартні методи: потенціометрія, метод поляризаційних кривих, дослідження опірності корозії при постійній деформації, профілометрія, метод оптичної металографії.

Результати. Вивчено електрохімічну гетерогенність зварного з'єднання (на прикладі сталі Х70) з заводським зварним швом. Встановлено, що в зварному шві цього з'єднання децю менший вміст порівняно з основним металом таких елементів: Al (0,025 % і 0,02 %, відповідно) та Nb (0,033 % і 0,058 %, відповідно), але більший вміст Mo і Cr. Структура основного металу – феритобейнітна, невеликі перлітні утворення, структура шва різномірна, містить дисперсний голчатий, зернограничний полігональний, доевтектоїдний ферит та окремі ділянки пластинчатого фериту. Зроблено висновок, що в дослідженому зварному з'єднанні більшу електрохімічну активність будь-якої зони можна зв'язати з меншим вмістом в ній легуючих елементів або особливостями мікроструктури. За результатами електрохімічних та прискорених корозійно-механічних випробувань в умовах, що моделюють експлуатаційні, встановлено, що вирішальним чинником для ініціювання локальної корозії зварних з'єднань є корозійно-активне середовище і умови перебігу корозійного процесу, зокрема – тонкоплівкова корозія в двофазному середовищі (вуглекислий газ-вода).

Наукова новизна. За результатами комплексного дослідження отримані нові дані щодо впливу хімічного складу та структури зон зварного з'єднання сталі Х70 з заводським поздовжнім зварним швом на її схильність до локального корозійного руйнування. Встановлено, більш висока електрохімічна активність будь-якої зони зварного з'єднання може бути обумовлена меншим вмістом в ній легуючих добавок (це стосується металу зварного шва) та/або особливостями мікроструктури (стосовно металу зварного шва та зони термічного впливу).

Практична значимість. Розроблено та обґрунтовано методичний підхід до дослідження локальної корозії зварних з'єднань в умовах, що моделюють експлуатаційні умови, на прикладі зварного з'єднання зі сталі Х70. Розроблено лабораторний стенд для досліджень. Встановлено, що вирішальним чинником для ініціювання локальної корозії зварних з'єднань є корозійно-активне середовище і умови перебігу корозійного процесу, зокрема – тонкоплівкова корозія в двофазному середовищі (вуглекислий газ-вода).

Ключові слова: трубна сталь Х70, потенціометрія, метод поляризаційних кривих, катодний потенціал, електрохімічна корозія, корозія під напруженням.

Вступ. Механічні властивості маловуглецевих або середньовуглецевих конструкційних сталей можна значно поліпшити за рахунок введення легуючих добавок. У деяких випадках їх невелика кількість, сприяючи покращенню механічних властивостей сталі, може підвищити й корозійну тривкість [1].

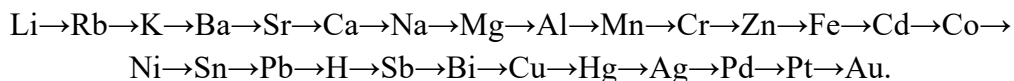
До таких добавок відносяться вуглець, кремній, мідь, хром, фосфор, сірка, марганець, молібден, нікель титан і ніобій. Імовірно, що підвищення корозійної тривкості при легуванні залежить від природи і кількості легуючих елементів, а також, причому, навіть більшою мірою, від корозивності середовища. Такі добавки, як мідь або хром, в низьколегованих

сталях можуть впливати на швидкість корозії, зміщуючи потенціал поверхні в бік більш позитивних значень, і тим самим полегшуючі пасивацію [2], що підтверджується результатами електрохімічних вимірів [3].

Однак, ефекти, обумовлені додаванням різних легуючих елементів, не адитивні. Практичний вплив легуючих добавок на корозійну стійкість сталі можна узагальнити таким чином:

- мідь при підвищенні її вмісту близько до 0,2 % помітно підвищує корозійну стійкість, подальше збільшення її вмісту майже не дає ефекту;
- фосфор, наприклад, в комбінації з міддю, також сприяє підвищенню корозійної стійкості, однак, вміст фосфору вище 0,10 % знижує механічні властивості сталі;
- хром в невеликих кількостях суттєво підвищує корозійну стійкість завдяки своїм пасивуючим властивостям;
- нікель, хоча дещо й знижує швидкість корозії, не чинить такого впливу, як вищеназвані три елементи;
- марганець, можливо, може бути дуже ефективним для середовищ, що містять хлориди, але механізм його впливу поки не з'ясовано;
- кремній ефективний приблизно у такій же мірі, як і марганець, але дані про його властивості суперечливі;
- молібден в низьколегованих сталях використовувався рідко, але може виявитися таким же ефективним, як мідь.

Згідно з електрохімічним рядом напруг (рядом активності металів) – послідовністю елементів в порядку збільшення їх стандартних потенціалів окиснення, який застосовується для порівняння активності металів, найпоширеніші елементи розташовуються таким чином [4]:



Тобто, чим менше значення має електродний потенціал металу, тим він хімічно активніше, легше окислюється і важче відновлюється зі своїх іонів.

Нижче наведено потенціали окиснення деяких металів, які застосовуються як легуючі добавки до сталі. Як видно з табл. 1, потенціали майже всіх легуючих елементів, крім нікелю і міді, більш від'ємні, ніж потенціал заліза. Їх введення до складу сталі може сприяти зміщенню потенціалу в негативний бік. При цьому їх висока хімічна активність поєднується з виключно високою корозійною стійкістю, що пояснюється наявністю на поверхні тонкої практично бездефектної плівки оксидів.

Постановка завдання. Зазвичай, у зварному з'єднанні, метал шва є більш легованим порівняно із основним металом. Це необхідно для того, щоб запобігти утворенню гальванічної пари між швом та основним металом, в якій внаслідок меншої площі шов працює як катод, та його переважному руйнуванню при контакті з корозивним середовищем. Але в практиці експлуатації відомі випадки переважного руйнування зварних швів. Треба зауважити, що таке руйнування зварного з'єднання властиве, в основному, для внутрішньої поверхні. Поставлено завдання дослідити електрохімічну гетерогенність та вплив хімічного складу і структури металу на локальну корозію зварних з'єднань на прикладі зварного з'єднання трубної сталі Х70 з заводським зварним швом.

Таблиця 1

Потенціали окиснення деяких металів

Електрод	Потенціал, В	Електрод	Потенціал, В
Al^{3+} / Al [5]	-1,7	Cr^{2+} / Cr	-0,91
Ti^{2+} / Ti [6]	-1,6	Fe^{2+} / Fe	-0,44
V^{2+} / V [7]	-1,19	Ni^{2+} / Ni	-0,24
Mn^{2+} / Mn	-1,18	Mo^{3+} / Mo [9]	-0,20
Nb^{2+} / Nb [8]	-0,96	Cu^{2+} / Cu	0,34

Методика експериментів. Дослідження проводили на зварному з'єднанні трубної сталі X70 із заводським зварним швом, виконаним автоматичним дуговим зварюванням, рис. 1.

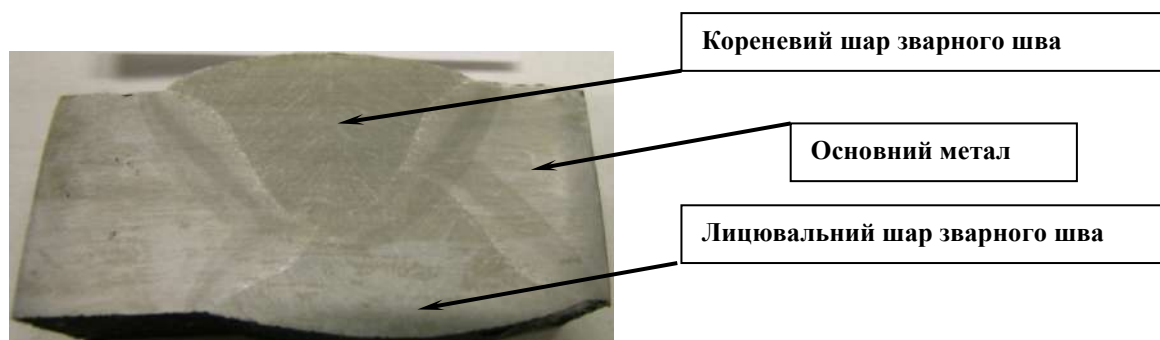


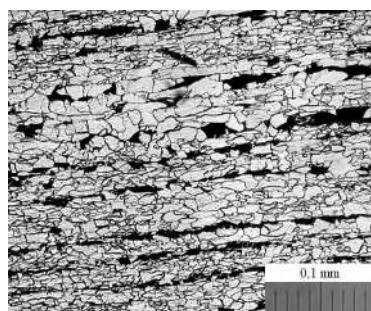
Рис. 1. Фото зразка досліджуваного зварного з'єднання зі сталі X70

Хімічний склад зон зварного з'єднання наведено в табл. 2, їх мікроструктуру – на рис. 2.

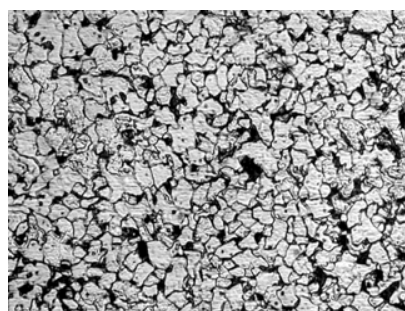
Таблиця 2

Хімічний склад основного металу та зварного шва досліджуваного зварного з'єднання зі сталі X70

Зона зварного з'єднання	C	Mn	Si	S	P	Al	Ni	Mo	Ti	V	Nb	Cr
Основний метал	0,098	1,68	0,28	0,007	0,010	0,025	0,02	0,31	0,001	0,01	0,058	0,01
Шов (внутр.)	0,090	1,65	0,34	0,013	0,013	0,02	0,04	0,36	0,001	0,01	0,033	0,03
Шов (зовн.)	0,089	1,65	0,33	0,015	0,013	0,02	0,04	0,38	0,001	0,01	0,034	0,03



a



б



в

Рис. 2. Мікроструктура зон зварного з'єднання сталі X70:

a – основний метал, б – кореневий шар зварного шва, $\times 400$; в – облицювальний шар зварного шва, $\times 400$

Для потенціометричних досліджень робочим розчином обирали розчин складу 0,1 М NaHCO₃ + 0,001 М NaCl. Поляризаційні криві знімали в потенціодинамічному режимі за триелектродною схемою зі швидкістю сканування потенціалу 5×10⁻⁴ В/с. Застосовували притиску комірку, площа зразка становила 0,29 см². Робочими електродами слугував зразок зварного з'єднання трубною сталі Х70, електродом порівняння – хлоридсрібний електрод, допоміжним – платиновий. З поляризаційних кривих визначені та обчислені потенціал корозії, струм в області активного анодного розчинення, нахил анодної поляризаційної кривої, граничний дифузійний струм, потенціал початку виділення водню.

Опірність корозії під напруженням вивчали постійній деформації, яка дорівнювала 0,95σ_T (σ_T - границя текучості сталі Х70, яка рівна 535 МПа) на прямокутних зразках розміром 200×20×10 мм, виготовлених зі зварного з'єднання сталі Х70. Зразки навантажували за чотириточковою схемою вигину в центральній зоні згідно з ГОСТ 9.901.2 (пункт 3.4.1.4) [10]. Стрілу вигину обчислювали за формулою:

$$y = \frac{\sigma(3H^2 - 4A^2)}{12Et} \quad (1)$$

де σ - величина заданих напружень, МПа; E - модуль пружності, Н/м²; t - товщина зразка, м; H - відстань між зовнішніми опорами, м; A - відстань між зовнішніми та внутрішніми опорами, м.

Дослідження проводили у розчині 3 % NaCl. Умови випробувань та їх тривалість описані нижче. Після корозійно-механічних випробувань проводили металографічні дослідження зразків.

Результати дослідження. Дослідження електрохімічними методами впливу хімічного складу різних зон зварного з'єднання трубною сталі Х70 на особливості анодної поведінки. Результати електрохімічних досліджень, рис. 3, показали, що в цьому зварному з'єднанні більшу активність проявляв зварний шов. Майже всі електрохімічні характеристики, за виключенням нахилу анодної поляризаційної кривої (який є меншим для основного металу), вказують на можливість переважного руйнування зварного шва, а саме: потенціал корозії зварного шва від'ємніше, ніж основного металу і становить -0,541 В та -0,316 В, відповідно; більші значення струму анодного розчинення металу шва (4,25 та 7,5×10⁻⁴ А/м², відповідно) та граничного дифузійного струму (0,27 і 0,17 А/м²), менш від'ємний потенціал виділення водню на ЗЗШ (-0,74 В і -0,85 В), відповідно, рис. 3, табл. 3.

З аналізу хімічного складу та мікроструктури (табл. 2 та рис. 2) встановлено, що в зварному шві цього з'єднання дещо менший вміст порівняно з основним металом таких елементів: Al (0,025 % і 0,02 %, відповідно) та Nb (0,033 % і 0,058 %, відповідно), але більший вміст Mo і Cr. Структура ОМ – ферито-бейнітна, невеликі перлітні утворення, структура шва різномірна, містить дисперсний голчатий, зернограничний полігональний, доєвтектоїдний ферит та окремі ділянки пластинчатого фериту, рис. 2.

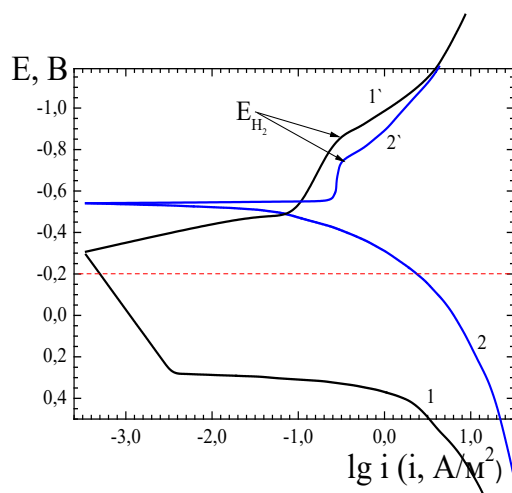


Рис. 3. Поляризаційні криві основного металу сталі X70 та зварного шва у розчині 0,1 М NaHCO₃ + 0,001М NaCl: 1 – основний метал; 2 – метал шва

Таблиця 3

Електрохімічні характеристики різних зон зварного з'єднання сталі X70 у розчині 0,1 М NaHCO₃ + 0,001М NaCl

Марка сталі	Зона ЗЗ	E_k , В	b_a , В	Електрохімічні характеристики процесів			
				анодного		катодного	
				E^* , В	i , А/м ²	i_d , А/м ²	E_{H_2} , В
X70	ОМ	-0,316	0,029	-0,20	$4,9 \times 10^{-4}$	0,2	-0,85
	ЗШ	-0,541	0,089		2,3	0,3	-0,74

ОМ – основний метал; ЗШ - зварний шов.
 *Потенціал в області активного анодного розчинення, за якого порівнювали струми анодного розчинення різних зон зварного з'єднання в активній області.

Таким чином, на електрохімічну гетерогенність зварного з'єднання впливає різниця вмісту легуючих елементів (Al, Nb, Mo та Cr) у складі основного металу та зварного шва, залежно від чого, локальні корозійні пошкодження можуть розвиватися у металі шва. Крім того, електрохімічна активність зварного шва може бути обумовлена присутністю різних структур.

Дослідження методами профілометрії та іншими методами локальної корозії зварних з'єднань трубної сталі в умовах, що моделюють експлуатаційні. Природний газ, що транспортується по магістральним трубопроводам, є не корозійно-активним. Але потрапляння в газове середовище корозійно-активних речовин та механічних домішок, наприклад води, вуглецевого газу, сірководню, може сприяти перебігу корозійних процесів на внутрішній поверхні трубопроводу. Газовий простір в трубопроводі може бути насичений парами рідких вуглеводнів та вологи, яка містить кисень. Наявність лише 10^{-4} об'ємних частин кисню у газовій суміші може збільшити швидкість корозії в присутності CO₂ і H₂S [11]. Найбільш пересиченими є шари, що прилягають до стінки трубопроводу, оскільки останні охолоджуються оточуючим середовищем. В таких умовах на внутрішній поверхні трубопроводу конденсуються пари води та леткі вуглеводні, які містять кисень [12]. Стікаючи до нижньої твірної трубопроводу, обидві рідини, що утворилися, інтенсивно перемішуються. Таким чином, на внутрішній поверхні стінки труби безперервно змінюється

склад корозійного середовища, яке є двофазним (вуглеводень + вода) і містить кисень [12]. Сконденсована волога, накопичуючись в нижній частині труби, має властивості мінералізованого середовища, що підвищує агресивність конденсату.

Таблиця 4

Особливості хімічного складу та структури зварного з'єднання сталі X70

Марка сталі, зона 33		Характеристики поведінки					
		E_{κ} , В	E^* , В	i , А/м ²	Вміст легуючих добавок		Структура
X70	Основ- ний метал	-0,316	-0,30	$7,5 \times 10^{-4}$	0,025 Al 0,058 Nb	0,28 Si 0,01 P 0,31 Mo 0,02 Ni 0,01 Cr	Ферито-перлітна, Бал зерна 9-10
	Зварний шов	-0,541		4,25	0,02 Al 0,033 Nb	0,34 Si 0,013 P 0,36 Mo 0,04 Ni 0,03 Cr	Дисперсний голчатий ферит, з прошарками зернограничного полігонального, доевтектоїдного фериту

Наявність неполярної фази – вуглеводню сприяє більш швидкому перенесенню кисню через тонкі шари до поверхні кородуючого металу. Розчинність кисню у вуглеводнях у 5-10 разів більша ніж у воді, тому в процесі дифузії частина розчиненого кисню переходить з фази рідких вуглеводнів у водну фазу, внаслідок чого в тонкій плівці сконденсованої вологи підтримується його висока концентрація.

Одним з чинників, який прискорює корозію, є рух корозивного середовища. Частина присутніх у водній фазі механічних домішок (карбонатів і сульфідів заліза, піску і глини) потрапляє в обертові краплі води і сприяє періодичному гідроерозійному пошкодженню захисної плівки в нижній частині труби. Так забезпечується постійне функціонування гальванічної макропарі оголений метал – труба, вкрита продуктами корозії. Найбільш небезпечним корозійним пошкодженням є корозійні виразки, утворення яких може привести до розвитку наскрізних пошкоджень. Виразки виникають на неоднорідностях, зокрема, на зварних швах. Часто виразки розвиваються уздовж твірної, на нижньому півколі труби. Осадження продуктів корозії заліза також сприяє утворенню виразок, особливо на протяжних горизонтальних ділянках.

Ураховуючи вищезазначене, розроблено методичний підхід до дослідження внутрішньої локальної корозії зварного з'єднання трубної сталі X70. Змодельовані умови, що відтворюють умови внутрішньої корозії, та розроблено лабораторну установку, яка забезпечувала рухомий потік водного середовища. Для відтворення напруженого стану стінки труби на зразки задавали постійну деформацію. Моделювання впливу двофазного середовища (вуглеводень + вода) проводили таким чином. На поверхню зразків наносили шар індустриального масла та витримували впродовж 24 годин для формування захисного шару, потім випробовували в рухомому потоці 3 % NaCl впродовж різного часу – 400 та 1500 годин. Фотографії зовнішнього вигляду зразків до та після корозійних випробувань наведено на рис. 4.

Під час корозійних випробувань на поверхні зразків утворився товстий шар продуктів корозії бурого кольору, щільно прилягаючий до поверхні. Після видалення продуктів корозії за результатами візуального огляду встановлено, що поверхня зазнала суцільної нерівномірної корозії, виявлені корозійні плями та виразки різної глибини. Методом профілометрії визначали глибину цих ушкоджень по ширині і довжині зразка в області основного металу з шагом 5 мм та в області зварного шва – через 2 мм. За результатами вимірювань глибини корозійних руйнувань будували профілограми, які представлені на рис. 5.

Для кількісної оцінки обчислювали середню глибину корозійних ушкоджень основного металу (ОМ) та зварного шва (ЗШ) [13] з урахуванням загальної кількості точок вимірювань за формулами:

$$h_{OM}^{сер} = \frac{\sum h_{OM}}{N_{OM}}, \quad (2)$$

$$h_{ЗШ}^{сер} = \frac{\sum h_{ЗШ}}{N_{ЗШ}}, \quad (3)$$

де $\sum h_{OM}$ - сумарна глибина корозійних ушкоджень основного металу, мм;
 $\sum h_{ЗШ}$ - сумарна глибина корозійних ушкоджень зварного шва, мм;
 N_{OM} - кількість точок вимірювань глибини корозійних ушкоджень основного металу;
 $N_{ЗШ}$ - кількість точок вимірювань глибини корозійних ушкоджень зварного шва.

Корозійну стійкість зварного шва та основного металу оцінювали за показниками:

- середня глибина корозійних руйнувань ОМ ($h_{OM}^{сер}$), металу ЗШ ($h_{ЗШ}^{сер}$), мм;
- швидкість корозії ОМ (Π_{OM}) та металу ЗШ ($\Pi_{ЗШ}$), мм/год;
- відношення швидкості корозії металу ЗШ до швидкості корозії ОМ ($\frac{\Pi_{ЗШ}}{\Pi_{OM}}$).

Швидкість корозії ОМ і металу ЗШ обчислювали за формулами:

$$\Pi_{OM} = h_{OM}^{сер} \frac{365}{\tau}, \quad (4)$$

$$\Pi_{ЗШ} = h_{ЗШ}^{сер} \frac{365}{\tau}, \quad (5)$$

де τ – тривалість випробувань, доби; 365 – кількість діб у році.

Результати оцінювання корозійної стійкості досліджених зразків зварних з'єднань наведено в табл. 5.

Металографічним методом уточнювали розміри корозійних уражень. Встановлено, що на поверхні зварних з'єднань утворилися корозійні плями та виразки. Ступінь пошкоджень поверхні основного металу та металу шва досліджених зварних з'єднань в деякій мірі відрізняється. Максимальні розміри виразок, визначені у перетині зварних з'єднань на мікрошліфах, наведені в табл. 6.

Таблиця 5

Результати оцінювання корозійної стійкості різних зон зварних з'єднань досліджених зразків

Характеристика зразків	Середня глибина корозійних ушкоджень зон зварного з'єднання, мм				Швидкість корозії зон зварного з'єднання, мм/рік				Відношення $\frac{P_{ЗШ}}{P_{ОМ}}$	
	400 годин		1500 годин		400 годин		1500 годин		400 годин	1500 годин
	$h_{ОМ}^{сер.}$	$h_{ЗШ}^{сер.}$	$h_{ОМ}^{сер.}$	$h_{ЗШ}^{сер.}$	$P_{ОМ}$	$P_{ЗШ}$	$P_{ОМ}$	$P_{ЗШ}$		
X70, ЗЗШ	0,208	0,245	0,206	0,128	0,19	0,22	0,05	0,031	1,16	0,62

На рис. 4 наведено фотографії зовнішнього вигляду зразків після випробувань та профілограми (рис. 5). Таким чином, після експонування впродовж 400 годин для середня глибина локальних корозійних уражень зварного з'єднання зі сталі X70 з заводським зварним швом становила: основного металу – 0,208 мм, зварного шва – 0,245 мм, найбільша – 0,26 мм та 0,2 мм, відповідно, табл. 5.

Таблиця 6

Характеристика локальних корозійних ушкоджень біля поверхневих шарів металу зразків зварних з'єднань та їх розміри після корозійних випробувань в умовах впливу постійної деформації і корозійно-активного середовища за результатами металографічних досліджень

Марка сталі	Максимальна довжина і глибина корозійних пошкоджень поверхні зварних з'єднань у перетині шліфа	
	Основний метал	Метал шва+ЗТВ
Після 400 годин		
X70	Протяжні корозійні виразки довжиною до 2 мм, глибиною до 0,26 мм	Окремі виразки глибиною до 0,2 мм, пітинги по лінії сплавлення
Після 1500 годин		
X70	Виразки довжиною 0,4 - 1 мм, глибиною до 0,26 мм. Пітинги	Значне локальне пошкодження ЗТВ довжиною до 12 мм, глибиною до 3-4 мм по лінії сплавлення. В іншій частині шва корозія не виражена.

З часом, після експонування в середовищі впродовж 1500 годин, середня глибина локальних уражень збільшилася для ОМ порівняно зі швом та становила 0,208 і 0,128 мм, відповідно. Найбільша глибина окремих локальних корозійних ушкоджень ОМ становила 0,26 мм. Відмічене протяжне пошкодження в зоні термічного впливу довжиною до 12 мм, глибиною до 3-4 мм по лінії сплавлення, в металі шва корозія не виражена. Відношення середньої глибини проникнення корозії в зварному шві до глибини проникнення корозії в основному металі зменшилося від 1,16 до 0,62, що вказувало на зменшення швидкості локального корозійного процесу на ЗЗШ з часом.

Отримані результати профілометрії та металографії для цього зварного з'єднання відрізняються від результатів електрохімічних випробувань.

За результатами прискорених корозійних випробувань в умовах, що моделюють експлуатаційні, встановлено, що у зварному з'єднанні зі сталі X70, більш активній корозії

піддається основний метал, причому така закономірність поведінки зварного з'єднання залишається з продовженням тривалості випробувань. Відношення середньої глибини проникнення корозії в зварному шві до глибини проникнення корозії в основному металі не змінилося та становило 1,13 як через 400 годин, так і через 1500 годин.

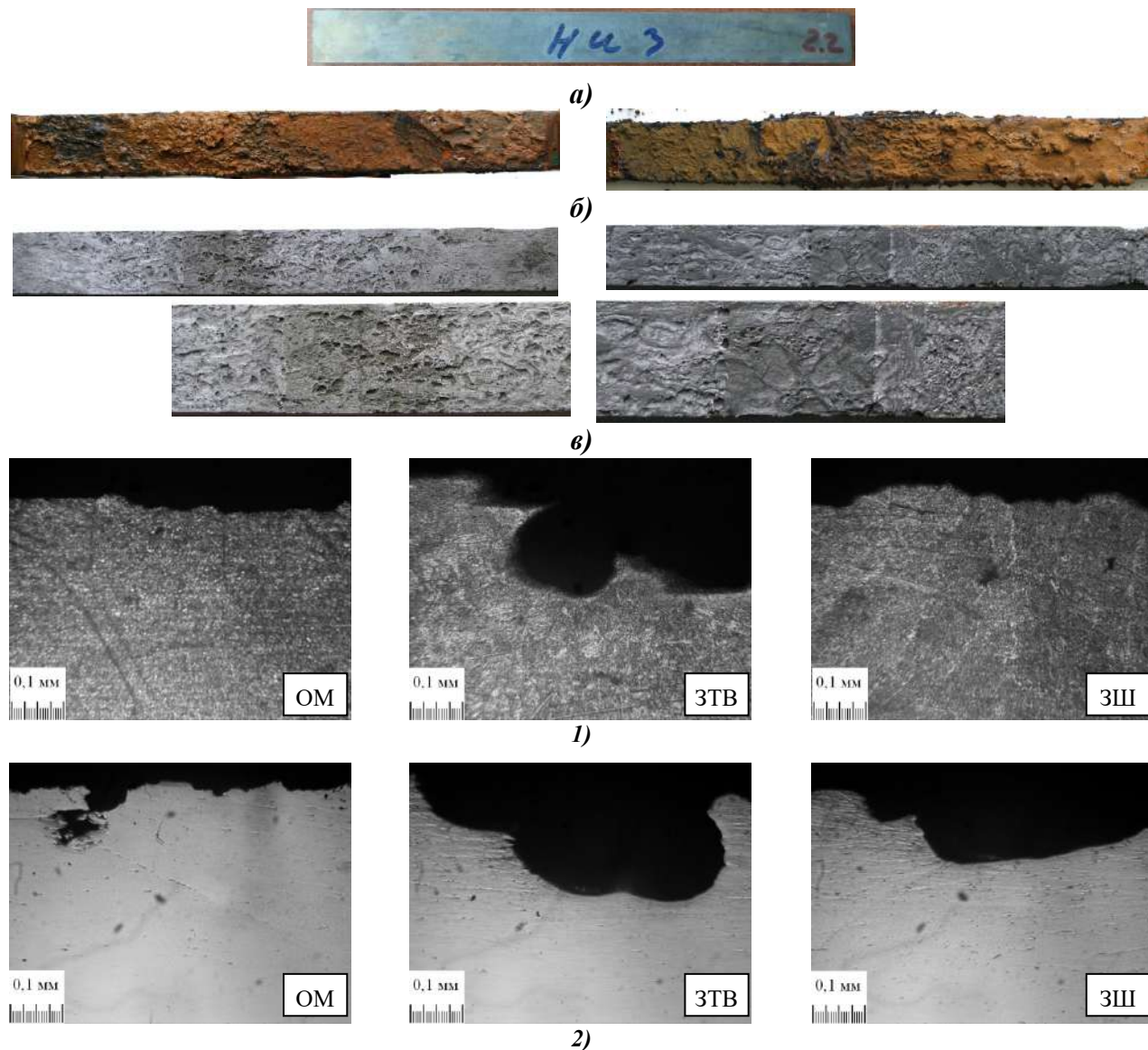


Рис. 4. Зовнішній вигляд зварного з'єднання зі сталі X70 з заводським зварним швом до та після корозійних випробувань в умовах, що моделюють експлуатаційні, впродовж різного часу: 1 – через 400 годин експонування; 2 – через 1500 годин експонування; а – до корозійних випробувань; б – з продуктами корозії; в – після видалення продуктів корозії; г – металографічні шліфи. ОМ – основний метал, ЗТВ – зона термічного впливу, ЗШ – заводський зварний шов

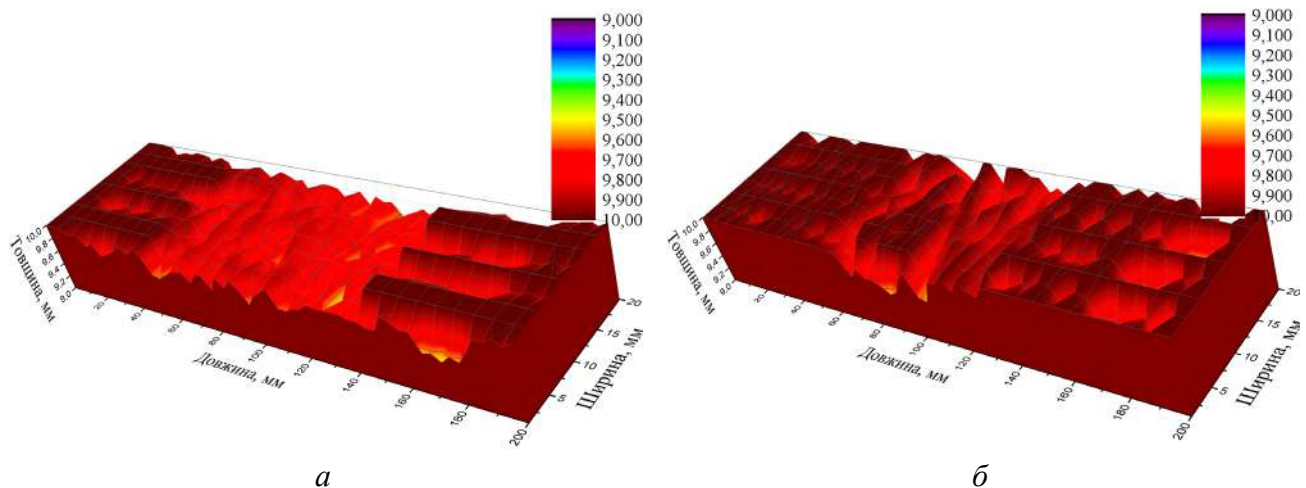


Рис. 5. Профілограма зварного з'єднання зі сталі X70 з заводським зварним швом після корозійних випробувань впродовж різного часу: а – 400 годин; б – 1500 годин

Висновки. За результатами дослідження гетерогенності зварного з'єднання зі сталі X70 з поздовжнім заводським зварним швом електрохімічними методами та методом оптичної мікроскопії встановлено, що більша електрохімічна активність зварного шва обумовлена меншим вмістом, порівняно з основним металом, легуючих добавок, а саме: Si, Al, Nb, Ti, Cr і гетерогенністю структури зварного шва. Аналізуючи відмінності в результатах, отриманих під час електрохімічних та прискорених корозійних випробувань, зроблено висновок про те, що вирішальним чинником у локальній корозії зварних з'єднань є корозійно-активне середовище і умови перебігу корозійного процесу, зокрема – тонкоплівкова корозія в двофазному середовищі (вуглеводень-вода).

Робота виконана за підтримки Національної академії наук України у 2016–2018 рр. (державний реєстраційний номер теми 0115U006701).

Література

1. Коррозия : Справ. изд. / под. ред. Л. Л. Шрайера ; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
2. Томашов Н. Д. Коррозия и защита сталей / Н. Д. Томашов, А. А. Локотилев. – М. : Машгиз, 1959. – 171 с.
3. Pourbaix M. Rapport technique No 160 Cebelcor. – Brussel. – 1969.
- 4 Сайт “Википедия”: Электрохимический ряд активности металлов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D0%B2> (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з

References

1. Shraier, L. L. (1982). *Korroziya* [Corrosion]. Moscow [in Russian].
2. Tomashov, N. D., Lokotyllov, A. A. (1959). *Korroziya y zashchyta staley* [Corrosion and steel protection]. Moscow [in Russian].
3. Pourbaix M. (1969) Rapport technique No 160 Cebelcor. Brussel [in English].
4. Sayt “Vikipediya”: Elektrokhimicheskiy ryad aktivnosti metallov [Site Wikipedia Electrochemical series of metal activity]. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D0%B2> [in Russian].
5. Sayt “Shkola suchasnykh znan”: Standartni 126

екрану.

5. Сайт “Школа сучасних знань” : Стандарти електродні потенціали деяких окисно-відновних систем. [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://www.zhu.edu.ua/mk_school/mod/glossary/view.php?id=3743, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

6. Сайт “Справочник химика 21. Химия и химическая технология” : Титан потенциалы коррозии. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <http://chem21.info/info/489595/>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

7. Сайт “Chemport.ru”: Электронный справочник. Нормальные окислительно-восстановительные потенциалы ванадия. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <http://www.chemport.ru/data/data392.shtml>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

8. Сайт «Справочник химика 21. Химия и химическая технология»: Ниобий, нормальный потенциал [Електронний ресурс] : – Режим доступу: <http://chem21.info/info/1293237/>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

9. Сайт «Справочник химика 21. Химия и химическая технология»: Электродный потенциал молибдена [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <http://chem21.info/info/859819/>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

10. ГОСТ 9.901.2-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса. Москва. Дата введения 1991-01-01.

11. Corrosion direct assessment of gastransmission pipelines – methodology. – Final Report. – GTI Contract No. 8329. – January 31, 2001 – April 1, 2002. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/gri.02-0057.2002.pdf>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

12. Негреев В. Г. Борьба с коррозией в нефтедобывающей промышленности. / В. Г. Негреев, А. А. Гоник, И.А. Мамедов, Г. С. Кесельман // Серия Борьба с коррозией в нефтедобывающей промышленности. – ЦНИИТЭнефтегаз. – Москва, 1965. – 84 с.

13. ОСТ 5.9255–76 Металлы и покрытия для судостроения. Методы ускоренных коррозионных испытаний. Москва. Дата введения 1977-01-01.

elektrodni potentsialy deyakyx okysno-vidnovnykh system [Site Website School of Modern Knowledge: Standard electrode potentials of some redox systems]. <http://www.zhu.edu.ua/>. Retrieved from http://www.zhu.edu.ua/mk_school/mod/glossary/view.php?id=3743 [in Ukrainian].

6. Sayt “Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”: Titan potentsialy korrozii [Site “Chemistry Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology”: Titanium corrosion potentials]. <https://chem21.info/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/489595/> [in Russian].

7. Sayt “Chemport.ru”: Elektronnyy spravochnik. Normal'nyye okislitel'no-vosstanovitel'nyye potentsialy vanadiya. [Site “Chemport.ru” : Electronic reference book. Normal redox potentials of vanadium]. <http://www.chemport.ru/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/859819/> [in Russian].

8. Sayt “Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”: Niobiy, normal'nyy potentsial [Site “Chemistry Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology”: Niobium, normal potential]. <https://chem21.info/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/1293237/> [in Russian].

9. Sayt “Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”: Elektrodnyy potentsial molibdena [Site “Chemistry Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology”: Molybdenum electrode potential]. <https://chem21.info/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/859819/> [in Russian].

10. GOST 9.901.2-89. Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally i splavy. Ispytaniya na korroziionnoye rastreskivaniye obrastsov v vide izognutogo brusa [Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Tests for corrosion cracking of specimens in the form of a curved beam]. Moscow, Standartinform Publ., 1993, 36 p.

11. Corrosion direct assessment of gastransmission pipelines – methodology. – Final Report. – GTI Contract No. 8329. – January 31, 2001 – April 1, 2002. Retrieved from <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/gri.02-0057.2002.pdf> [in English].

12. Negreyev, V. G., Gonik, A. A., Mamedov, I. A., Kesel'man, G. S. (1964). Bor'ba s korroziyey v nefte dobyvayushchey promyshlennosti. [Corrosion control in the oil industry] *Seriya Bor'ba s korroziyey v nefte dobyvayushchey promyshlennosti - Series Corrosion Control in the Oil Industry*. Moscow [in Russian].

13. OST 5.9255–76 *Metally i pokrytiya dlya sudostroyeniya. Metody uskorennykh korroziionnykh ispytaniy*. [Metals and coatings for shipbuilding. Accelerated corrosion test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 1977, 27 p.

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

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

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ X70, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЕГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТЬЮ

НЫРКОВА Л. И.¹, ГОНЧАРЕНКО Л. В.¹, БОРИСЕНКО Ю. В.², ХАРЧЕНКО Ю. А.²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

²Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследование влияния химического состава и структуры на локальную коррозию сварного соединения трубной стали X70 в условиях, моделирующих эксплуатационные, и определение основных факторов коррозии.

Методика. Применяли стандартные методы: потенциометрия, метод поляризационных кривых, исследование сопротивляемости коррозии при постоянной деформации, профилометрия, метод оптической металлографии.

Результаты. Изучена электрохимическая гетерогенность сварного соединения (на примере стали X70) с заводским сварным швом. Установлено, что в сварном шве этого соединения несколько меньшее содержание по сравнению с основным металлом следующих элементов: Al (0,025% и 0,02% соответственно) и Nb (0,033% и 0,058% соответственно), но большее содержание Mo и Cr. Структура основного металла - феррито-бейнитная, небольшие перлитные образования, структура шва разнородная, содержит дисперсный игольчатый, зернограничный полигональный, доэвтектоидный феррит и отдельные участки пластинчатого феррита. Сделан вывод, что в исследованном сварном соединении большую электрохимическую активность какой-либо зоны можно связать с меньшим содержанием в ней легирующих элементов или особенностями микроструктуры. По результатам электрохимических и ускоренных коррозионно-механических испытаний в условиях, моделирующих эксплуатационные, установлено, что решающим фактором для инициирования локальной коррозии сварных соединений является коррозионно-активная среда и условия протекания коррозионного процесса, в частности - тонкопленочная коррозия в двухфазной среде (углекислород- вода).

Научная новизна. По результатам комплексного исследования получены новые данные о влиянии химического состава и структуры зон сварного соединения стали X70 с заводским продольным сварным швом на ее склонность к локальному коррозионному разрушению. Установлено, более высокая электрохимическая активность любой зоны сварного соединения может быть обусловлена меньшим содержанием в ней легирующих добавок (это касается металла сварного шва) и/или особенностями микроструктуры (относительно металла сварного шва и зоны термического влияния).

Практическая значимость. Разработан и обоснован методический подход к исследованию локальной коррозии сварных соединений в условиях, моделирующих эксплуатационные, на примере сварного соединения стали X70. Установлено, что решающим фактором для инициирования локальной коррозии сварных соединений является коррозионно-активная среда и условия протекания коррозионного процесса, в частности - тонкопленочная коррозия в двухфазном среде (углекислород - вода).

Ключевые слова: трубная сталь X70, потенциометрия, метод поляризационных кривых, катодный потенциал, электрохимическая коррозия, коррозия под напряжением.

FEATURES OF LOCAL CORROSION OF WELDED JOINT OF PIPE STEEL X70 DUE TO ITS ELECTROCHEMICAL HETEROGENITY

NYRKOVA L. I.¹, GONCHARENKO L. V.¹, BORYSENKO Yu. V.², KHARCHENKO Yu. O.²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

²Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Establishing the influence of chemical composition and structure on local corrosion of the welded joint of X70 pipe steel in the conditions simulating operating conditions, and determining the main corrosion factors.

Methodology. Standard methods were used: potentiometry, polarization curves method, research of corrosion resistance at constant deformation, profilometry, optical metallography.

Results. The electrochemical heterogeneity of the welded joint (on the example of X70 steel) with the factory weld was studied.

It was found that in the weld of this joint has a slightly lower content compared to the base metal of the following elements: Al (0.025% and 0.02%, respectively) and Nb (0.033% and 0.058%, respectively), but a higher content of Mo and Cr. The structure of base metal is ferritic-bainite, has small pearlite formations, the structure of the seam is heterogeneous, contains dispersed needle, grain boundary polygonal, pre-eutectoid ferrite and separate areas of lamellar ferrite. It is concluded that in the welded joint under studied, the greater electrochemical activity of any zone can be attributed to the lower content of alloying elements or features of the microstructure. According to the results of electrochemical and accelerated corrosion-mechanical tests in the simulated operating conditions, it was found that the determinative factor for initiating of local corrosion of welded joints is the corrosive environment and conditions of the corrosion process flying, in particular – thin-film corrosion in a two-phase medium (hydrocarbon water).

Scientific originality. According to the results of complex research, new data on the influence of the chemical composition and structure of the welded joints of steel X70 with factory extensional weld on the susceptibility to local corrosion were obtained. It was found that in a welded joint, the greater electrochemical activity of any zone is due to the lower content of alloying additives (this applies to the weld metal) and/or the peculiarities of the microstructure (for weld metal and high affected zone).

Practical value. The methodological approach to investigation of local corrosion of welded joints in the conditions which are simulating the condition of operation, on an example of welded joints of X70 steel is developed and substantiate. A laboratory stand for research has been developed. It is established that the determinative factor for initiating of local corrosion of welded joints is the corrosive-active medium and the conditions of the corrosion process flying, particularly – thin-film corrosion in a two-phase medium (hydrocarbon-water).

Key words: X70 pipe steel, potentiometry, polarization curve method, cathodic potential, electrochemical corrosion, stress corrosion.

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2020.4.12>

УДК 678.047:
681.61.064

БУДЬКО О.В., БУТЕНКО О.О., ХОМЕНКО В.Г., ТВЕРДОХЛІБ В.С.,
БАРСУКОВ В.З., ЧЕРНИШ О.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета. Розробити основи технології одержання електропровідних покриттів з використанням ультразвукового диспергування вуглецевих матеріалів.

Методика. В роботі використані методи: ультразвукового диспергування матеріалів, оптичної мікроскопії, чотирьох електродний метод вимірювання електропровідності покриттів. Вимірювання захисних властивостей матеріалів від високочастотного електромагнітного випромінювання проведені відповідно до стандарту ASTM D4935. Опрацювання результатів досліджень здійснювали з використанням комп'ютерних програм Microsoft Office Excel та ImageJ.

Результати. В роботі шляхом ультразвуку проведена обробка вуглецевих матеріалів з розвиненою питомою поверхнею. Встановлений вплив ультразвукової обробки на ефективність диспергування технічного вуглецю в етанолі. Визначені параметри процесу руйнування часток природного графіту під дією обробки ультразвуком. Запропонований механізм структуроутворення після дії обробки ультразвуком компонентів композитного матеріалу. Встановлений процес формування просторової електропровідної сітки в суспензії диспергованого технічного вуглецю. Показано, що застосування ультразвукової обробки, при одержанні композитних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання, дозволяє одержати орієнтовані частинки вуглецевого компоненту в полімерній матриці носія і одержані зразки мають високу поверхневу електропровідність та ефективність екранування.

Наукова новизна. Встановлено вплив ультразвукової обробки вуглецевих матеріалів на закономірності одержання, структуру та властивості розроблених електропровідних покриттів для захисту від електромагнітного випромінювання.

Практичне значення. Розроблено основи технології одержання композиційних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання на основі вуглецевих матеріалів попередньо диспергованих з використанням ультразвукової обробки. Обґрунтовано оптимальні параметри ультразвукової обробки вуглецевих матеріалів для одержання композитів.

Ключові слова: ультразвук, диспергування, екрануючі покриття, графіт, технічний вуглець, електропровідність, електромагнітне випромінювання.

Вступ. Відповідно до висновків Всесвітньої організації охорони здоров'я електронний «смог» в даний час перевищує природний фон у сотні тисяч разів. Ця організація вважає питання захисту населення від електромагнітного випромінювання більш важливою проблемою навіть у порівнянні з проблемою захисту від радіації [1].

Металеві екрани, які захищають від електромагнітного випромінювання, в наш час ефективно замінюються електропровідними полімерними композитами на основі вуглецевих матеріалів [2,3]. Відомо, що електромагнітні хвилі в значній мірі відбиваються навіть від надтонкого металевого покриття. Однак полімерні композити на основі вуглецевих матеріалів мають ряд переваг: вони дешевші, легші, не кородують, їм простіше надавати потрібну форму. Крім того, полідисперсність вуглецевих часточок сприяє розсіюванню та поглинанню

електромагнітних хвиль. Найпростіші такі композити складаються з трьох компонентів: природного графіту, технічного вуглецю і полімерного зв'язуючого [4]. Основна роль відводиться графіту: від форми, розміру і орієнтації його часточок суттєво залежить електропровідність композиту [5, 6].

Враховуючи просторову анізотропію електропровідності часточок графіту, в композит додають технічний вуглець. По електропровідності він поступається графіту, але в полімерній матриці здатен формувати просторову сітку, яка покращує електричний контакт між призматичними гранями часточок графіту. Для утворення ефективної електропровідної сітки промисловий гранульований технічний вуглець диспергують до часточок необхідних розмірів [7, 8,]. Серед різних методів диспергування твердих тіл заслуговує уваги ультразвуковий метод [9], який дозволяє не тільки достатньо чітко контролювати процес, але й видаляти адсорбовані вуглецевими часточками низькомолекулярні речовини, які негативно впливають на електропровідність композиту. Крім того, диспергування проходить в суцільному рідкому середовищі, що перешкоджає окисленню диспергованих часточок.

Постановка завдання. За мету роботи поставлено дослідження впливу ультразвукової обробки вуглецевих матеріалів для одержаних захисник композитних покриттів від електромагнітного випромінювання; виявлення впливу режимів ультразвукової обробки на структуру та характеристики полімер-вуглецевих композитів.

Методологія досліджень. У роботі були досліджені наступні вуглецеві матеріали: акумуляторний графіт ГАК (ЗАТ «Заваллівський графіт», Україна), гранульована ацетиленова сажа «VULCAN P» (Cabot Corporation, США). Для отримання полімер-вуглецевих композитів в якості зв'язуючого використовувався 10%-ий спиртовий розчин полівінілбутиралу (ПВБ).

Диспергування компонентів проводилось із застосуванням ультразвукового диспергатора (УЗД) марки УЗДН–А1200Т з використанням наконечника діаметром 20 мм в товстостінному скляному циліндрі діаметром 4,5 см з параболічним дном. В якості робочої рідини використаний ізопропіловий спирт або дистильована вода об'ємом 40 мл. В процесі ультразвукової обробки диспергування циліндр охолоджувався водою. Максимальна потужність ультразвукового генератора становила 1200 Вт. Структура зразків досліджена в прохідному, відбиваючому і змішаному світлі методами оптичної мікроскопії з використанням оптичних мікроскопів МБІ-15У42 та МБС-9.

Одержані суспензії наносилися ракельним методом аплікатором із зазором 300 мкм за допомогою приладу компанії TMAXCN на папір щільністю 120 г/см². Товщина шару композитного полімер-вуглецевого покриття складала 80-150 мкм. Питомий опір зразків визначений чотирьохелектродним методом за допомогою комірки ST2558B-F01 [1].

Ефективність екранування високочастотного випромінювання композитів визначена відповідно до стандарту ASTM D4935. Дослідження проведені за допомогою вимірювального комплексу фірми Keysom Corp. (Японія). Комплект обладнання включав векторний аналізатор електричних ланцюгів MS46122B-020 і спеціалізований набір TEM-комірок (Transversal ElectroMagnetic Cell) [10].

Результати дослідження. Експериментально визначені характеристики сажі «VULCAN P»: середній розмір частинок та їх розподіл, рН водної витяжки, зольний залишок. Вказаний зразок має низьку насипну щільність ($0,273 \text{ г/см}^3$) і високу маслоємність (4,2 мл/г). Слабокисла реакція водної витяжки (рН=5,8) вказує на незначне окислення цього матеріалу. Аналіз зольного залишку, отриманого при температурі $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 3 годин, вказує, що він переважно складається з дрібнодисперсних кристалів оксиду заліза (рис 1).

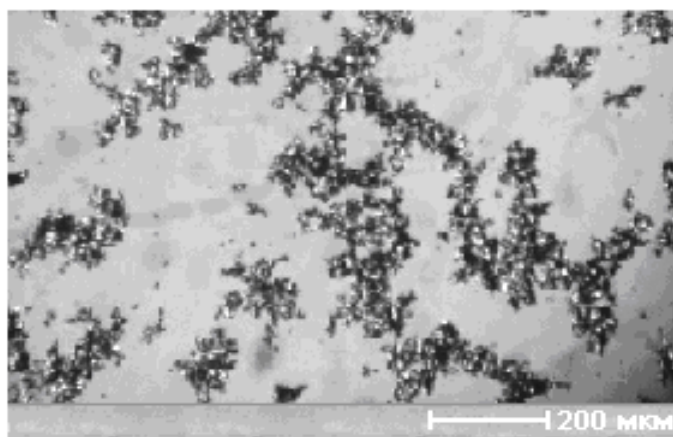


Рис. 1. Мікрофотографія зольного залишку після термічної обробки сажі «VULCAN P»

Гранули промислової ацетиленової сажі мають близьку до кулеподібної форму. Поверхня цих гранул достатньо гладка. Розмір гранул - від десятків до сотень мікрометрів. Під дією зовнішнього навантаження вони крихко розколюються із утворенням часточок з плоскими гранями і гострими кутами.

В роботі досліджений режим диспергування. Обробка зразку при різній потужності УЗ генератора становила 2 с., пауза -2 с., загальна тривалість обробки - 30 хв. Відомо, що значення порогу перколяції для композитів на основі різних зразків ацетиленової сажі знаходиться в діапазоні 12-25%. Максимальну електропровідність мають композити з вмістом сажі 70% [7, 8]. Із зразків сажі «VULCAN P», що пройшли ультразвукову обробку, були виготовлені композитні матеріали із зв'язуючим у співвідношенні 1:1. Питомий опір одержаних матеріалів наведена у табл.1.

Таблиця 1

Залежність питомого опору зразків від інтенсивності ультразвукової обробки зразку сажі

Потужність УЗД*, Вт	120	240	480	720	840	960	1080
Питомий опір, Ом·см	–	1306	507	290	188	620	1376

*- Потужність ультразвукового генератора (УЗД)

Відповідно до Табл. 1, при збільшенні потужності генератора до 840 Вт питомий опір зразків зменшується, а подальше підвищення потужності УЗД призводить до погіршення характеристик. Відомо, що електропровідність технічного вуглецю залежить від ступеня

організації його первинної структури [11, 12]. Руйнування такої структури може призводити до зменшення електропровідності полімерного композиту, а відповідно до зростання питомого опору покриття. Зменшенню електропровідності сприяє також збільшення контактного опору між високодисперсними часточками. Враховуючи одержані результати, потужність УЗ генератора була обмежена 840 Вт.

Ефективність диспергування технічного вуглецю можна оцінити за поведінкою утвореної суспензії при відключенні генератора. На початкових стадіях диспергування відбувається седиментація часточок в суспензії. Швидкість седиментації обумовлена розміром часточок. При зменшенні розміру часточок, суспензія поступово перетворюється в гель, який у спокійному стані ущільнюється з утворенням чіткої границі з рідиною.

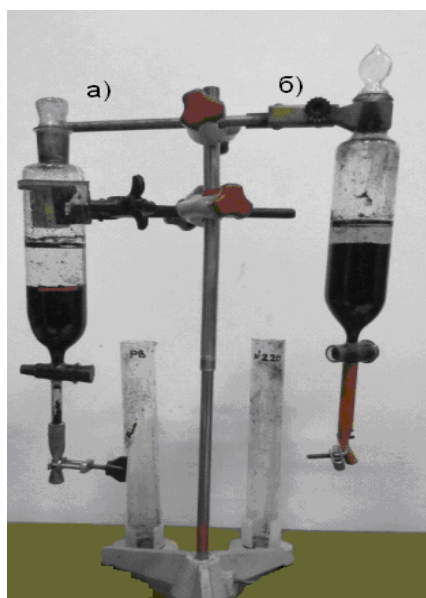


Рис. 2. Об'єми гелю через певний час після диспергування: а) 10 хв.; б) 30 хв

Об'єм гелю через фіксований час після диспергування пов'язаний з розміром часточок сажі. Процес утворення гелю досліджений мікроскопічним методом. На скло з ввігнутою поверхнею наносилась розбавлена суспензія диспергованої сажі. На початкових етапах досліду за допомогою оптичного мікроскопа можна спостерігати хаотичний рух елементарних часточок. Часточки часто стикаються одна з одною, змінюючи при цьому напрям руху. Також зіткнення призводить до з'єднання часточок. Не виключено, що між ними за рахунок неспарених електронів, які утворились при руйнуванні гранул, виникає хімічний зв'язок. Таким чином, поступово утворюються гнучкі лінійні і розгалужені ланцюжки. По мірі росту їх рухливість зменшується. В процесі випарювання рідини із ввігнутого скла, ланцюжки наближаються один до одного і утворюють пористі об'ємні агрегати. На наступній стадії випарювання рідини формується просторова малорухома структура гелю. Етапи гелеутворення представлені на рис. 3.

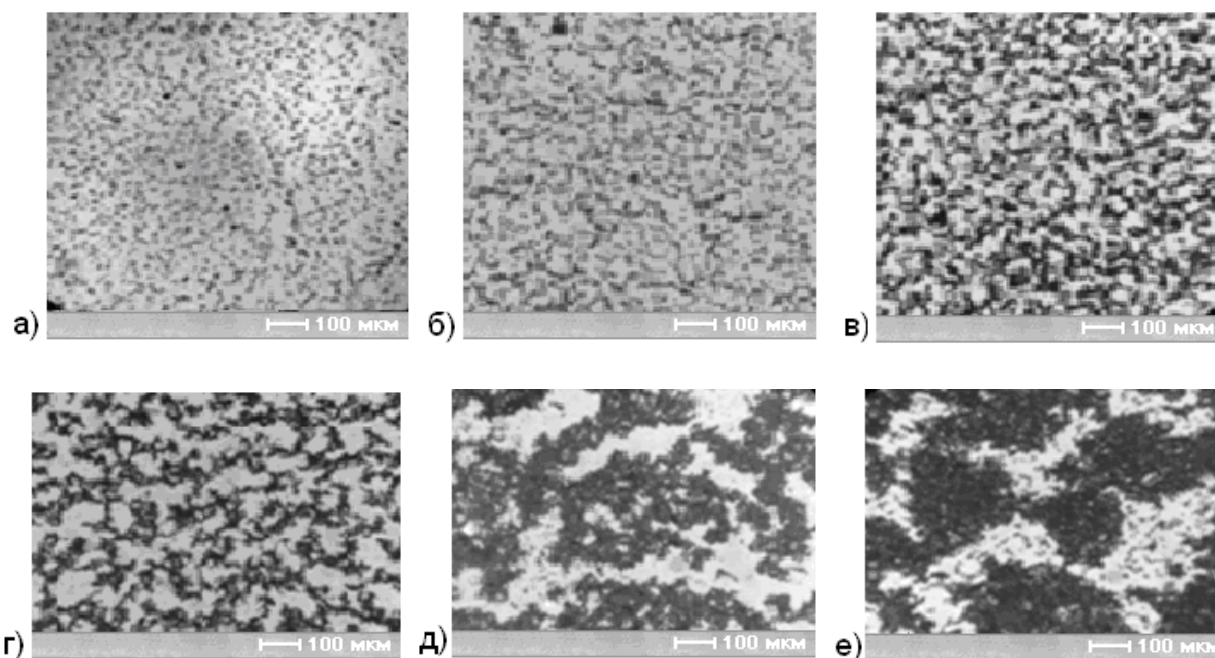


Рис. 3. Мікрофотографії утворення гелевої структури: а- початок експерименту; б- через 7 с.; в- через 12 с.; г- через 17 с.; д – через 22 с.; е - через 30 с

Повне висушування гелю призводить до утворення достатньо щільної пористої структури сажі, що потребує її додаткового диспергування при виготовленні композитних матеріалів.

Акумуляторний графіт ГАК відноситься до крупнодисперсних графітів. Експериментально визначено, що основна кількість часточок має розміри від 100 до 200 мкм, але зустрічаються часточки, розмір яких досягає 500 мкм. Форма часточок може бути як двох-вимірною так і трьох-вимірною (рис.4).

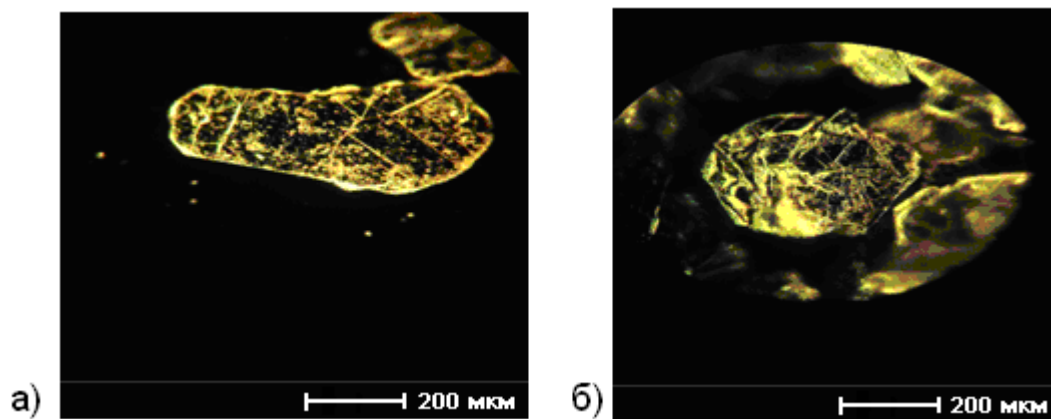


Рис. 4. Форма часточок графіту: а) двох-вимірною, б) трьох-вимірною

Товщина двох-вимірних часточок від долі мікрметра до декількох мікрметрів. Трьох-вимірні часточки графіту в більшості випадків утворені ансамблем більш дрібніших часточок з

різною просторовою орієнтацією. Бокові грані часточок часто заокруглені. Ймовірно, що в процесі переробки руди відбувається деформація периферійних ділянок графенових шарів. На базових поверхнях великих часточок можна бачити значну кількість дрібно-дисперсних часточок. Оскільки розмір двох-вимірних часточок значно перевищує товщину покриттів, то очевидно, що при нанесенні композиту на тверду поверхню вони орієнтуються паралельно поверхні. Звичайно, що така орієнтація повинна сприяти підвищенню поверхневої електропровідності. Враховуючи просторову анізотропію механічних властивостей кристалів графіту, можна передбачити, що ультразвукове диспергування сприяє розщепленню їх часточок по графенових шарах і збільшенню загальної площі поверхні цього матеріалу. Дійсно, при диспергуванні спостерігається розщеплення часточок графіту по міжграфеновим площинам (рис. 5а) і часткове дроблення графенових шарів (рис.5б).

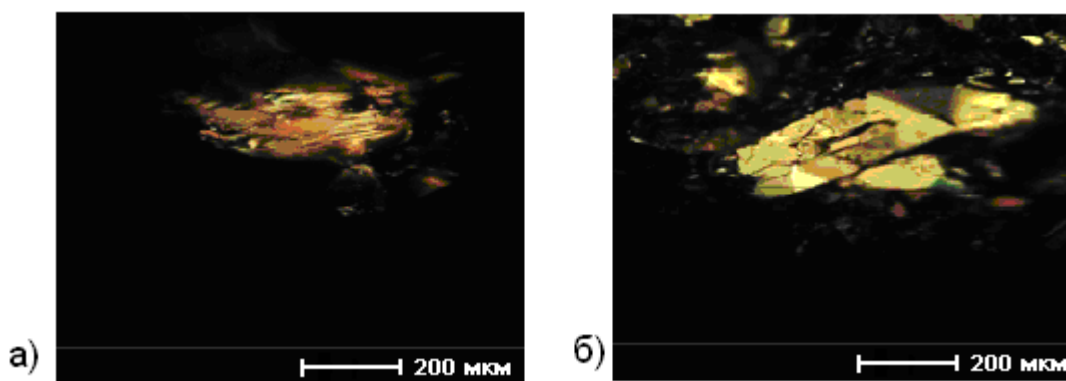


Рис. 5. Часточки диспергованого ультразвуком графіту ГАК

Такому дробленню сприяють внутрішні дефекти у вигляді мікропорожнин і дрібних мінеральних включень. Після диспергування графіту протягом 30-ти хвилин середній розмір часточок зменшився приблизно на 40%. Характерно, що дрібнодисперсні часточки диспергованого графіту в суспензії здатні формувати достатньо стійкі об'ємні структури.

Для того, щоб з'ясувати можливий вплив зміни структурних змін в графіті на його електропровідність, були виготовлені зразки на основі вихідного і УЗ диспергованого графіту. Поверхневий опір зразків з графітом, що піддавався УЗ диспергуванню, виявився в середньому на 30% нижчим.

Також ультразвук здійснює вплив і на макромолекули зв'язуючого. Метод віскозиметрії показав, що в'язкість 10%-го розчину ПВБ після десятихвилинного диспергування у вибраному режимі зменшилась приблизно в 1,5 рази. Згідно опублікованих даних, при дії на розчини полімерів ультразвуку відбувається деструкція макромолекул з утворенням макро-радикалів [13, 14].

Таким чином встановлено, що ультразвук здатен впливати на всі компоненти, які використовуються при виготовленні електропровідних композитів [15,16]. Очевидно, що розрив хімічних зв'язків у процесі руйнування кожного компонента є причиною утворення вільних радикалів.

Для з'ясування впливу УЗ обробки вихідних матеріалів на властивості виготовлених з них покриттів, були досліджені композити, отримані в наступних умовах:

№1 – по технології без використання УЗ обробки;

№2 – з попереднім УЗ диспергуванням вуглецевих компонентів.

Властивості цих композитів представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Властивості композитів, виготовлених без (№1) і з використанням (№2) УЗ обробки

Зразки	Поверхневий опір, Ом·см	Екранування ЕМВ, дВ
№1	3.0	-32
№2	2.5	-36

Всупереч нашим очікуванням, що сумісне диспергування ультразвуком графіту з розчином зв'язуючого призведе до зменшення електропровідності покриття за рахунок утворення ізолюючих полімерних шарів навколо вуглецевих часточок, електропровідність зросла в порівнянні з покриттями, отриманими звичайним перемішуванням диспергованих вуглецевих компонентів з розчином зв'язуючого. Таке покриття виявилось більш щільним, без видимих дефектів. Ймовірно, що в цьому випадку УЗ не тільки сприяє очищенню поверхні вуглецевих часточок і їх гомогенному розподілу в композиті, а також зшиванню компонентів у суміші за рахунок утворених вільних радикалів.

Висновки. У роботі були досліджені властивості композитів на основі полівінілбутиралу, наповнених вуглецевими матеріалами, що піддавалися ультразвуковому диспергуванню. Показано, що параметрами (потужність УЗГ та часові періоди обробки) ультразвукового процесу можна контролювати та досягти оптимального складу композитного матеріалу. Запропонований режим ультразвукової обробки дає можливість досягти ефективного диспергування вуглецевих матеріалів, керувати процесом створення просторової електропровідної сітки в суспензії та провести очищення поверхні графіту від аморфного вуглецю та дрібних частинок. Це дозволяє одержувати композитні покриття з поліпшеними електричними і захисними властивостями. В роботі одержанні композитні матеріали з високою ефективністю екранування (до 36 дБ) високочастотного випромінювання.

Література

1. Банный В.В., Игнатенко В.А. Применения полимерных радиопоглощающих материалов в решении проблемы электромагнитной безопасности. Проблемы здоровья и экологии. 2016. 3(49). С. 9-13.
2. Электромагнитные экраны на основе наноструктурированных углеродосодержащих материалов. Е.С. Белоусова [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. Минск: Бестпринт, 2017. 317 с.
3. Lulu Zhong, Rufang Yu, Xinghua Hong. Review of carbon-based electromagnetic

References

1. Bannyiy V.V., Ignatenko V.A. 2016. Primeneniya polimernyih radiopogloschayuschih materialov v reshenii problemyi elektromagnitnoy bezopasnosti. [The use of polymeric radio-absorbing materials in solving the problem of electromagnetic safety] Problemyi zdorovya i ekologii. 3(49). 9-13. [in Russian].
2. Belousova E.S. (2017). Elektromagnitnyie ekrany na osnove nanostrukturirovannyih uglerodosoderzhaschih materialov. [Electromagnetic screens based on nanostructured carbon-containing materials]. Pod red. L.M. Lyinkova. Minsk. Bestprint. 317. [in Russian].
3. Lulu Zhong, Rufang Yu, Xinghua Hong. (2020). Review of

shielding materials: film, composite, foam, textile. 2020. Textile Research Journal. P. 1-17.

4. Барсуков В. З., Сенік 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.

5. Будько О.В., Бутенко О.О., Хоменко В.Г., Короташ І.В., Твердохліб В.С., Барсуков В.З. Вплив морфології природних графітів на екрануючі властивості композитних матеріалів. Вісник КНУТД №6 (140) 2019. С. 48-57.

6. Лушечкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. М.: Химия, 1988. 160 с.

7. Гуль В. Е., Шенфиль Л. З. Электропроводящие полимерные материалы. М. Химия. 1984. 240 с.

8. Березкин В.И. Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. СПб.: АртЭго. 2013. 450 с.

9. Jasmin Schomakers, Axel Mentler, Herwig Mayer. Determination of dissolved organic carbon in soils with UV spectroscopy, ultrasonic dispersion pre-treatment and separation with size exclusion chromatography. SJSS. Spanish journal of Soil Science. 2014. V. 4 (20). P.127-142.

10. Бутенко О. О., Черниш О.В., Хоменко В. Г., Твердохліб В. С., Барсуков В. З. Особливості впливу наноматеріалів на екранування електромагнітного випромінювання композитами. Вісник КНУТД №3 (146) 2020. С. 155-164.

11. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. Санкт-Петербург: НОТ. 2009. 664 с.

12. Криков В. С., Колмакова Л. А. Электропроводящие полимерные материалы. М. Энергоатомиздат, 1984. 176 с.

13. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. Изд. 3-е. перераб. и доп. М. Химия. 1978.

14. Семенюк Н.Б., Левицька Х.В., Дзяман І.З., Дудок Г.Д., Скорохода В.Й. Використання ультразвуку у реакціях

carbon-based electromagnetic shielding materials: film, composite, foam, textile. Textile Research Journal. 1-17. [in English]

4. 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 composite material for protection against EMR and method for producing composite material on substrate]. Patent Ukrainy na vynakhid, №117949. [in Ukrainian].

5. Budko O.V., Butenko O.O., Khomenko V.H., Korotash I.V., Tverdokhlib V.S., Barsukov V.Z. (2019). Vplyv morfolohii pryrodnykh hrafitiv na ekranuiuchi vlastyivosti kompozytnykh materialiv. [Influence of morphology of natural graphites on shielding properties of composite materials]. Visnyk KNUTD. 6 (140). 48-57. [in Ukrainian].

6. Lusheykin G.A. (1988). Metody issledovaniya elektricheskikh svoystv polimerov. [Methods for studying the electrical properties of polymers]. M. Himiya. 160. [in Russian].

7. Gul V. E., Shenfil L. Z. (1984). Elektroprovodyaschie polimernyye materialy. [Electrically conductive polymer materials]. M. Himiya. 240. [in Russian].

8. Berezkin V.I. (2013). Uglyerod: zamknytiye nanochastitsyi, makrostrukturnyye materialy. [Carbon: closed nanoparticles, macrostructures, materials]. SPb. ArtEgo. 450. [in Russian].

9. Jasmin Schomakers, Axel Mentler, Herwig Mayer. (2014). Determination of dissolved organic carbon in soils with UV spectroscopy, ultrasonic dispersion pre-treatment and separation with size exclusion chromatography. SJSS. Spanish journal of Soil Science. 4 (20). 127-142. [in English]

10. Butenko O. O., Chernysh O.V., Khomenko V. G., Tverdokhlib V. S., Barsukov V. Z. (2020). Osoblyvosti vplyvu nanomaterialiv na ekranuvannya elektromagnitnoho vyprominyuvannya kompozytamy. [Features of the influence of nanomaterials on shielding of electromagnetic radiation by composites] Visnyk KNUTD. 3(146). 155-164. [in Ukrainian].

11. Mihaylin Yu.A. (2009). Spetsialnyie polimernyye kompozitsionnyie materialy. [Special polymer composite materials]. Sankt-Peterburg: NOT. 664. [in Russian].

12. Krikorov V. S., Kolmakova L. A. (1984). Elektroprovodyaschie polimernyye materialy. [Electrically conductive polymer materials]. M. Energoatomizdat. 176. [in Russian].

13. Baramboym N.K. (1978). Mehanohimiya vyisokomolekulyarnyih soedineniy. [Mechanochemistry of high molecular weight compounds]. Izd. 3-e. pererab. i dop. M. Himiya. [in Russian].

одержання полімерів полівінілпіролідону та (нано) композитів на їхній основі. Вісник НУ «Львівська політехніка». 2018. С. 220-225.

15. Kang, W., & Li, H. Enhancement of flaky graphite cleaning by ultrasonic treatment. Royal Society Open Science. 2019. V. 6(12). P.1-11.

16. Guittonneau, F., Abdelouas, A., Grambow, B., & Huclier, S. The effect of high power ultrasound on an aqueous suspension of graphite. Ultrasonics Sonochemistry. 2010. V. 17(2). P.391-398.

14. Semeniuk N.B., Levytska Kh.V., Dziaman I.Z., Dudok H.D., Skorokhoda V.I. (2018). Vykorystannia ultrazvuku u reaktsiiakh oderzhannia polimeriv polivinilpirolidonu ta (nano) kompozytiv na yikhonii osnovi. [The use of ultrasound in reactions for the production of polymers of polyvinylpyrrolidone and (nano) composites based on them]. Visnyk NU Lvivska politekhnika. 220-225. [in Ukrainian].

15. Kang, W., & Li, H. (2019). Enhancement of flaky graphite cleaning by ultrasonic treatment. Royal Society Open Science. 6(12). 1-11. [in English]

16. Guittonneau, F., Abdelouas, A., Grambow, B., & Huclier, S. (2010). The effect of high power ultrasound on an aqueous suspension of graphite. Ultrasonics Sonochemistry. 17(2). 391-398 [in English]

BUTKO OKSANA

oksanadendura@gmail.com

Dpartment 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

Dpartment of Electrochemical PowerEngineering and
Chemistry

Kyiv National University of Technologies and Design

BARSUKOV VIACHESLAV

Scopus Author ID: 8590938100

orcid.org/0000-0002-3041-2474

ResearcherID: O-6308-2017;

v-barsukov@i.ua

Dpartment 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;

butenco@bigmir.net

Dpartment of Electrochemical Power
Engineering and Chemistry

Kyiv National University of Technologies and Design

TVERDOHLIB VIKTOR

orcid.org/0000-0002-5764-9842

tverdohlib.vs@knutd.edu.ua

Dpartment of Electrochemical PowerEngineering and
Chemistry

Kyiv National University of Technologies and Design

CHERNYSH OKSANA

Scopus Author ID: 56818919300

orcid.org/0000-0002-9402-1595

ResearcherID: X-2552-2018;

chernish.ov@knutd.edu.ua

Dpartment of Electrochemical Power
Engineering and Chemistry

Kyiv National University of Technologies and Design

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

БУДЬКО О. В., БУТЕНКО О. А., ХОМЕНКО В. Г., ТВЕРДОХЛЕБ В. С.,
БАРСУКОВ В. З., ЧЕРНЫШ О.В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработать основы технологии получения электропроводящих покрытий с использованием ультразвукового диспергирования углеродных материалов.

Методика. В работе использованы методы: ультразвукового диспергирования материалов, оптической микроскопии, четырех электродный метод измерения электропроводности покрытий. Измерение защитных свойств от высокочастотного электромагнитного излучения проведены в соответствии со стандартом ASTM D4935. Обработка результатов исследований осуществляли с использованием компьютерных программ Microsoft office Excel и ImageJ.

Результаты. В работе путем ультразвука проведена обработка углеродных материалов с развитой удельной поверхностью. Установлено влияние ультразвуковой обработки на эффективность диспергирования технического углерода в этаноле. Определены параметры процесса разрушения частиц природного графита под действием обработки ультразвуком. Предложенный механизм структурообразования после воздействия обработки ультразвуком компонентов композитного материала. Установленный процесс формирования пространственной электропроводящей сетки в суспензии диспергированного технического углерода. Показано, что применение ультразвуковой обработки при получении композитных материалов для защиты от электромагнитного излучения позволяет получить ориентированные частицы углеродного компонента в полимерной матрице носителя и полученные образцы имеют высокую поверхностную электропроводность и эффективность экранирования.

Научная новизна. Установлено влияние ультразвуковой обработки углеродистых материалов на закономерности получения, структуру и свойства разработанных электропроводящих покрытий для защиты от электромагнитного излучения.

Практическое значение. Разработаны основы технологии получения композиционных материалов для защиты от электромагнитного излучения, на основе углеродных материалов предварительно диспергированных с использованием ультразвуковой обработки. Обоснованы оптимальные параметры ультразвуковой обработки углеродистых материалов для получения композитов.

Ключевые слова: ультразвук, диспергирование, экранирующие покрытия, графит, технический углерод, электропроводность, электромагнитное излучение.

APPLICATIONS OF ULTRASOUND IN MANUFACTURING PROCESS OF ELECTRIC CONDUCTIVE COATINGS BASED ON CARBON MATERIALS

BUDKO O. V., BUTENKO O.O., KHOMENKO V.G., TVERDOKHLIB V.S.,
BARSUKOV V.Z., CHERNYSH O.V.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Development of the basics of technology for obtaining electrically conductive coatings using ultrasonic dispersion of carbon materials.

Methods. The following methods were used in the work: ultrasonic dispersion of materials, optical microscopy, four-electrode method of measuring the electrical conductivity of coatings. The shielding effectiveness of materials was performed following ASTM D4935. The research results were processed using computer programs Microsoft office Excel and ImageJ.

Results. The ultrasound treatment of carbon materials with a high specific surface area was performed. The influence of ultrasonic treatment on the efficiency of dispersion of carbon black in ethanol was established. The parameters of the process of destruction of natural graphite particles under the action of ultrasonic treatment are determined. The mechanism of structure formation into the composite material after ultrasonic treatment was proposed. The process of forming a spatial electrically conductive grid in a suspension by dispersed carbon black was established. It was shown that the use of ultrasonic treatment in the production of electromagnetic shielding materials allows to obtain oriented particles of the carbon component in the polymer matrix of the carrier and to get samples with high surface conductivity and shielding efficiency.

Scientific novelty. The influence of ultrasonic treatment of carbon materials on the fabrication process, structure, and properties of shielding materials was established.

Practical significance. The basics of the technology of the manufacturing process of shielding materials based on carbon materials pre-dispersed using ultrasonic treatment were developed. The optimal parameters of ultrasonic treatment of carbon materials for manufacturing shielding materials were substantiated.

Keywords. ultrasound, dispersion, shielding coatings, graphite, carbon black, electrical conductivity, electromagnetic radiation.

УДК 676.1. 013 +
676.4

ЧЕРЬОПКИНА Р.І., ТРЕМБУС І.В., ДЕЙКУН І.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НАПІВФАБРИКАТИ ІЗ НЕДЕРЕВНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАПЕРУ

Мета. Основною метою наукової роботи є дослідження впливу технологічних параметрів екологічно чистого способу делігніфікації недеревної сировини з отриманням волокнистих напівфабрикатів придатних для виробництва пакувальних видів паперу.

Методика. Для дослідження використовували стебла ріпаку, натронно-содовий варильний розчин, каталізатор антрахінон. Варіння січки проводили у сталевих автоклавах, які опускали у гліцеринову баню. Застосовано стандартні методики визначення показників якості (виходу та вмісту залишкового лігніну) недеревного волокнистого напівфабрикату. В якості математичного методу обробки даних використовували метод узагальненого приведення градієнта. Лабораторні зразки відливіків волокнистих напівфабрикатів та паперу виготовляли на листовідливному апараті ЛА-2, механічні показники зразків визначали згідно стандартних методик з використанням відповідних приладів.

Результати. Доведено доцільність використання стебел ріпаку для перероблення на волокнисті напівфабрикати в умовах лужного середовища. Встановлено, що найбільший вплив на делігніфікацію сировини має підвищення температури варіння з 80 до 120 °С та використання каталізатора антрахінона. Показано, що отримані напівфабрикати із ріпаку мають достатні паперотвірні властивості та в композиції з макулатурою марки МС 5Б придатні для використання у виробництві паперу для гофрування марки Б-3.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні екологічного способу перероблення відходів аграрного виробництва для отримання волокнистих напівфабрикатів за низьких температур. На прикладі стебел ріпаку досліджено вплив технологічних параметрів на показники якості напівфабрикатів та за допомогою методів математичної обробки експерименту визначено оптимальне співвідношення волокнистий напівфабрикат/макулатура, за якого показники міцності паперу для гофрування будуть відповідати нормам стандарту.

Практична значимість. Наведені результати досліджень показують доцільність використання відходів олійних культур для перероблення на волокнисті напівфабрикати, з метою розширення сировинної бази паперово-картонного виробництва.

Ключові слова: стебла ріпаку, делігніфікація, натронно-содове варіння, каталізатор, фізико-механічні показники, папір для гофрування.

Вступ. З усієї різноманітності рослинного світу культурні та дикорослі рослини являють собою потужний сировинний ресурс для виробництва волокнистих напівфабрикатів (ВНФ) для целюлозно-паперової промисловості. Для територій, які мало забезпечені основною целюлозовмісною деревною сировиною, можливість успішного використання недеревної сировини для потреб паперової промисловості підтверджується економічними та екологічними аспектами [1, 2]. Однак, визначальними факторами її використання є доступність та вартість.

У даний час обсяги виробництва паперу і картону значно випереджають темпи росту виробництва ВНФ, що призводить до зниження вмісту первинного волокна в готовій продукції. Причинами такої тенденції є зростання вартості первинних напівфабрикатів та збільшення питомих капітальних затрат на створення нових потужностей для їх виробництва [3, 4].

Скорочення частки ВНФ з деревини в композиції паперу стало можливим за рахунок як зниження втрат волокна у виробництві, використання наповнювачів, пігментів, макулатури, а також і недеревних волокон. Одночасно із цим відбуваються структурні зміни у напівфабрикатній базі, які направлені на розширення використання менш дефіцитних і більш дешевих видів недеревної сировини, відходів аграрного виробництва, а також підвищеному використанню з них напівфабрикатів високого виходу [4 - 7].

Суттєвим імпульсом розвитку виробництва недеревних волокнистих напівфабрикатів є наявність сировини в необхідних кількостях за рахунок її щорічної відновлюваності, менших витрат ресурсів, умовами охорони навколишнього середовища (рослинні рештки не мають практичного застосування в інших галузях і тому часто піддаються спалюванню на полях), забезпечення необхідними споживчими властивостями паперу та картону.

Дослідженнями показано, що ВНФ із соломи злакових, олійних – ріпаку, сої, соняшнику характеризуються високим вмістом полісахаридів з низьким ступенем їх полімеризації, особливо пентозанів, мінеральної частини, неоднорідністю фракційного складу волокон за наявності великої кількості клітин неволокнистого характеру, порівняно малими розмірами волокон [5, 6]. До переваг використання таких напівфабрикатів треба віднести легше їх розмелювання, із-за наявності значної кількості геміцелюлоз, які полегшують проникнення води у волокна. Це призводить до ослаблення структури волокна і притягування води, що прискорює його набухання і підвищує здатність до фібрилювання. Розмелювання таких волокон потребує відносно невисоких витрат енергії і навіть відразу після варіння соломи можна досягати її високого ступеня млива без розмелювання [8, 9]. Із-за неоднорідності волокон недеревних напівфабрикатів вони характеризуються низькою водовіддачею, що призводить до сповільнення зневоднення полотна паперу на машині. З метою уникнення таких труднощів напівфабрикати із недеревної сировини використовують у композиції з іншими видами волокнистих матеріалів.

Використання стебел ріпаку в якості целюлозовмісної сировини має великий потенціал щодо розширення сировинної бази з отриманням якісних первинних напівфабрикатів для виготовлення паперу. Вибір цієї сировини обумовлений тим, що вона відноситься до відходів з низькою вартістю та не використовується іншими галузями, має щорічну відновлюваність, а за вмістом вуглеводної частини близька до листяних порід деревини [5].

Постановка задачі. Основною метою наукової роботи є дослідження впливу технологічних параметрів натронно-содового способу делігніфікації недеревної сировини з отриманням волокнистих напівфабрикатів придатних для виробництва пакувальних видів паперу.

Матеріали та методи дослідження. Для досягнення мети даної роботи необхідно вивчити хімічний склад стебел ріпаку, провести їх делігніфікацію в умовах лужного середовища за низьких температурних режимів та різних витрат основних реагентів, з отриманням волокнистих напівфабрикатів, придатних для використання їх у композиції пакувальних видів паперу.

У роботі, для отримання волокнистих напівфабрикатів, використовували стебла озимого ріпаку, які піддавали подрібненню на січку до розмірів 15-20 мм. Січка зберігалася в ексикаторі для підтримання постійної вологості і хімічного складу. Хімічний склад стебел ріпаку було досліджено за стандартними методиками TAPPI [10].

Натронно-содовий варильний розчин отримували з попередньо приготованих концентрованих розчинів відповідно соди і натрій гідроксиду у співвідношенні 50 : 50 об'ємних %. Витрати активного лугу становили 12 та 14 % в одиницях Na_2O від маси абсолютно сухої сировини (абс. сух. сировини). У приготованих варильних розчинах визначали масову частку натрій гідроксиду за стандартною методикою та виміряли рН [10].

Делігніфікацію січки проводили за гідромодуля 5 : 1 з використанням каталізатора антрахінону (АХ) в кількості 0,1 % від маси абс. сух. сировини та без нього, наважку якого додавали безпосередньо в автоклав. Для варіння використовували сталеві автоклави, завантажені січкою і варильним розчином, які опускали у попередньо нагріту до необхідної температури гліцеринову баню та витримували за кінцевої температури 15 хв. Температура варіння становила 80, 100, 120 °С. По закінченні визначеного часу масу піддавали гарячому розмелюванню за температури близько 70 °С, промивали проточною водою до нейтральних значень рН промивних вод, зважували на аналітичних вагах, визначали вихід та ступінь делігніфікації за стандартною методикою [10].

Розмелювання отриманих напівфабрикатів проводили у млині відцентрово-розмелювального апарата (ВРА) до досягнення ступеня млива 60 ± 2 °ШР – у випадку визначення показників міцності одержаних волокнистих напівфабрикатів та до 45 ± 2 °ШР – у випадку виготовлення паперу для гофрування. У композиції паперу використовували макулатуру марки МС 5Б, яку попередньо подрібнювали на шматочки, замочували у воді та розмелювали у лабораторному розмелювальному комплексі (ЛРК) до 45 ± 2 °ШР. Ступінь млива ВНФ та макулатури визначали на апараті СР-2 типу Шоппер-Ріглера.

Лабораторні зразки отриманих волокнистих напівфабрикатів та паперу виготовляли на листовідливому апараті (ЛА-2) за стандартною методикою [10]. Згідно стандартів волокнисті напівфабрикати отримували масою 1 метра квадратного 75 г та для паперу для гофрування 112г [11]. Папір для гофрування виготовляли із 100 % відповідно розмелених напівфабрикатів ріпаку та в композиції напівфабрикатів із макулатурою за рівного співвідношення (50 : 50). Зразки отриманих волокнистих напівфабрикатів та паперу піддавали аналізу на механічну міцність після кондиціонування за умов: температура (23 ± 1) °С; відносна вологість повітря $(50 \pm 2)\%$; тривалість 2,5 год. Для зразків волокнистих напівфабрикатів визначали: розривну довжину (ГОСТ 1924.1), опір роздиранню (ДСТУ 3368-96), опір продавлюванню (ДСТУ 13525.8), міцність на злом під час багаторазових перегинів (ДСТУ 3476).

Для зразків паперу визначали: опір продавлюванню (ДСТУ 13525.8), опір торцевому стисненню (ГОСТ 28686), опір площинному стисненню (ДСТУ EN ISO 7263).

Результати дослідження. У даній роботі в якості об'єкта дослідження використовували стебла ріпаку, які попередньо піддавали аналізу на хімічний склад. Отримані результати хімічного складу наведено в табл. 1.

З аналізу отриманих даних табл. 1 видно, що за вмістом полісахаридів та лігніну стебла ріпаку близькі до листяних порід деревини, але відрізняються підвищеним вмістом смол, жирів та восків (СЖВ) і мінеральної частини. Виходячи з хімічного складу щодо основної вуглеводної частини, ці види однорічних рослин можна вважати задовільними для отримання волокнистих напівфабрикатів, але вони потребують відповідних способів перероблення, із-за підвищеного вмісту мінеральної частини та СЖВ. Однак, необхідно відмітити, що високі значення екстрактивних речовин у вигляді СЖВ, які в основному зосереджені на поверхні

стебел, перешкоджають проникненню хімічних реагентів в середину стебла, що збільшує тривалість обробки такої сировини. До особливостей переробки однорічних рослин слід віднести підвищений вміст у них, в порівнянні із деревиною, мінеральних речовини, які піддаються розчиненню в умовах лужної обробки. Тому, перероблення січки за високих значень рН варильного розчину одночасно має позитивний вплив на видалення із рослинної сировини небажаних компонентів, щодо якості напівфабрикатів, сприяє збільшенню швидкості набухання волокон та частковому розрихленню складної серединної пластинки між щільно упакованими волокнами поверхневого шару стебла. З метою більш глибокої взаємодії компонентів варильного розчину із складовими сировини та ефективною її делігніфікації пропонується використання екологічного натронно-содового способу.

Таблиця 1

Хімічний склад стебел недеревної сировини та деревини, %

Сировина	Целюлоза	Лігнін	Пентозани	Екстракція H ₂ O	Екстракція спирто-бензольною сумішшю, (СЖВ)	Зольність
Стебло ріпаку	38,7	25,7	26,1	12,2	2,2	3,9
Пшенична солома: стебло*	44,0	16,5	26,7	10,1	5,2	6,6
Береза*	41,0	21,0	28,0	2,2	1,8	0,47

*Літературні дані [3].

Делігніфікації піддавали січку ріпаку в лужному середовищі за різних температур та витрат активного луку, з додаванням каталізатора, або без нього. Отримані результати наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Показники якості волокнистих напівфабрикатів

Температура, °С		80	100	120	80	100	120
Показник Вихід, %/ Лігнін, %	Каталізатор антрахінон	Витрати активного луку 12 %			Витрати активного луку 14 %		
		Вихід/ лігнін	–	83,5/ 20,1	82,2/ 19,0	79,8/ 17,5	81,0/ 19,7
Вихід/ лігнін	+	80,2/ 18,5	78,7/ 17,4	75,3/ 16,5	79,5/ 17,0	77,0/ 16,7	74,2/ 15,4
Розривна довжина, м	–	1850	2090	2180	1950	2100	2230
	+	2000	2450	2500	2200	2250	2550
Опір продавлюванню, кПа	–	73	81	95	87	98	105
	+	86	94	97	93	102	113
Опір роздиранню, мН	–	267	295	321	300	330	390
	+	300	305	360	345	350	342

В результаті хімічного перероблення січки отримано волокнисті напівфабрикати, які за виходом можна охарактеризувати як солон'яна маса та напівцелюлоза. Помічено, що

підвищення температури від 80 до 120 °С, за інших рівних умов, має переважаючий вплив на делігніфікацію сировини. Дана закономірність підтверджується збільшенням показників міцності в середньому на 8 - 20%. Частково це можна пояснити тим, що у традиційних способах варіння лігнін починає розчинятися після 100 °С. Порівнюючи дані, отримані для напівфабрикатів із додаванням каталізатора антрахінона та без нього, прослідковується його позитивний вплив на їх якісні показники. Ступінь провару сировини з використанням каталізатора посилюється. Це в свою чергу призводить до покращення фізико-механічних показників ВНФ. Застосування каталізатора для делігніфікації недревної сировини в слабо лужному середовищі, дозволяє підвищувати показники міцності напівфабрикатів в межах 5 - 7%. Дещо менший вплив на делігніфікацію січки спостерігається у разі збільшення витрат активного луку на 2 %. За таких умов оброблення січки, лігнін розчиняється досить в незначній кількості, що підтверджується даними табл. 2. Слід зауважити, що показники міцності напівфабрикатів, отриманих содово-натронним способом є нижчими в порівнянні з напівфабрикатами, отриманими нейтрально-сульфітним способом із цієї ж сировини та із соломи [3, 7]. Основним поясненням може бути нижчий ступінь делігніфікації січки, що має переважаючий вплив на якість фібрилювання волокна та показники міцності напівфабрикатів.

З метою раціонального застосування отриманих содово-натронних напівфабрикатів із ріпаку їх використовували у композиції з макулатурою марки МС 5Б у співвідношенні 50 : 50 для отримання паперу для гофрування (рис. 1).

Результати експериментальних досліджень були піддані математичній обробці з метою визначення оптимального співвідношення напівфабрикат із ріпаку/макулатура, за якого фізико-механічні показники виготовленого паперу будуть відповідати нормам стандарту [11].

Як показав попередній кореляційний аналіз, найбільш чутливим до зміни співвідношення напівфабрикат зі стебел ріпаку/макулатура є параметр «абсолютний опір продавлюванню».

Виходячи з цього, сформовано такий критерій пошуку точки оптимуму: необхідно підібрати співвідношення напівфабрикат зі стебел ріпаку/макулатура, за якого виготовлений папір матиме параметри якості «абсолютний опір продавлюванню» 170 кПа (значення, що визначається стандартом) за умови виконання обмежень на інші параметри якості [11].

У формалізованому вигляді поставлену задачу можна подати у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} 0,0052X^2 + 0,73X + 145 \geq 170 \\ 0,000065X^2 + 0,0033X + 0,61 = 0,65 \\ -0,0066X^2 + 0,03X + 116 \geq 110 \end{cases} \quad (1)$$

де: X – вміст макулатури у волокнистій композиції паперу для гофрування.

Ліва частина першого рівняння є регресійною залежністю величини абсолютного опору продавлюванню від відсоткового вмісту макулатури у композиції; другого рівняння – опору торцевому стисненню; третього рівняння – опору площинному стисненню. Для всіх отриманих регресійних моделей величина достовірності апроксимації становить не менше 0,95, що дає підстави вважати отримані регресійні моделі такими, що відповідають реальному об'єкту.

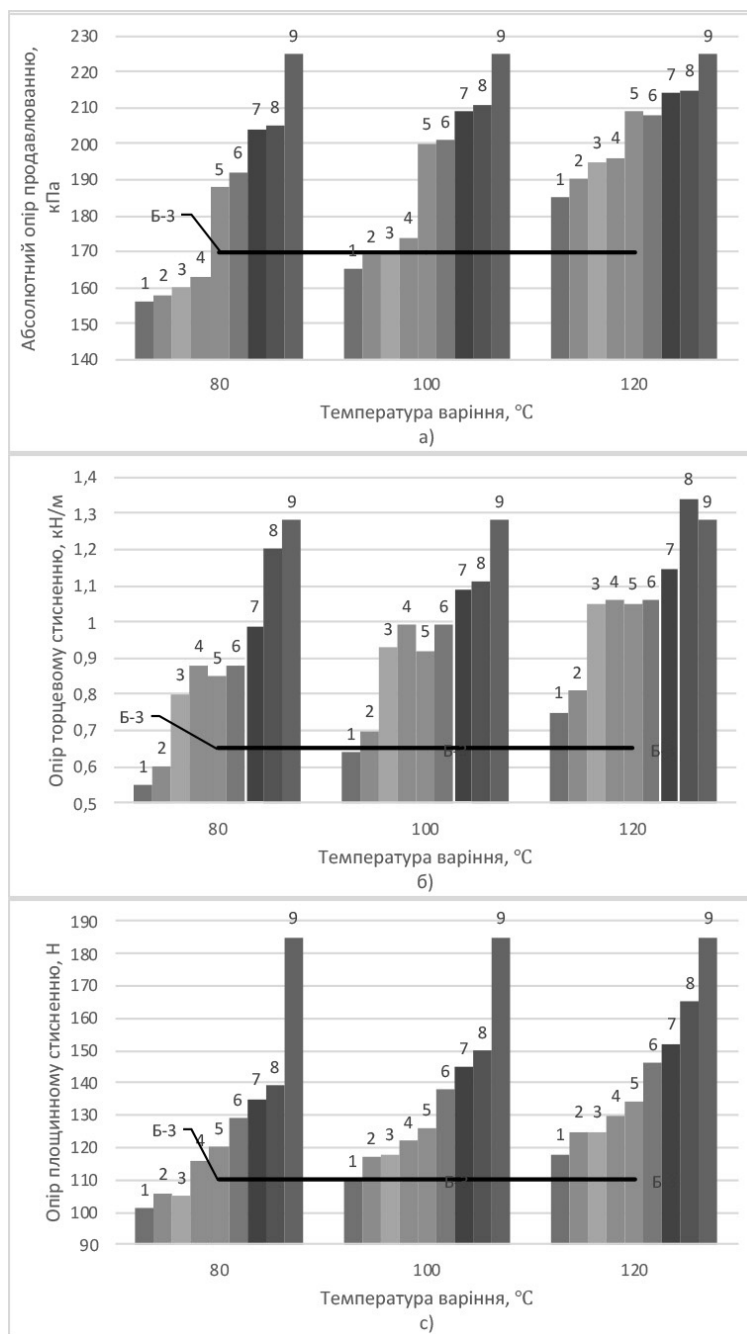


Рис. 1. Залежність фізико-механічних показників паперу для гофрування від композиції напівфабрикатів: а) абсолютний опір продавленню; б) опір торцевому стисненню; в) опір площинному стисненню: 1, 2 – напівфабрикат зі стебел ріпаку без АХ та з АХ (12 %);

3,4 – напівфабрикат зі стебел ріпаку з АХ та без АХ (14 %); 5,6 – напівфабрикат зі стебел ріпаку з АХ та без АХ витрати акт. лугу 12 % + макулатура (50:50); 7,8 – напівфабрикат зі стебел ріпаку з АХ та без АХ витрати акт. лугу 14 % + макулатура (50:50); 9 – макулатура 100 %

З використанням методу узагальненого приведенного градієнта визначено, що за температури 100 °C і витрат активного лугу 12 % без АХ оптимальним співвідношенням масових часток напівфабрикатів, отриманих із стебел ріпаку та макулатури є відповідно 63,5% та 36,5 %. За визначених умов показники якості готового паперу будуть становити: абсолютний опір продавленню – 170 кПа; опір торцевому стисненню – 0,72 кН/м; опір площинному стисненню – 119,4 Н. Отримані результати вказують на те, що виконано всі умови пошуку точки оптимуму.

За інших умов, температури 120 °С, витрат луку 12 %, без каталізатора АХ з використанням методу узагальненого приведенного градієнта визначено, що оптимальним співвідношенням масових часток напівфабрикатів, отриманих із стебел ріпаку та макулатури є відповідно 71,5% та 28,5%. За визначених умов показники якості готового паперу будуть становити: абсолютний опір продавлюванню – 170 кПа; опір торцевому стисненню – 0,77кН/м; опір площинному стисненню – 122,2 Н. Отримані результати вказують на те, що виконано всі умови пошуку точки оптимуму. Аналіз отриманих результатів показує ефективність підвищення температури варіння стебел ріпаку з метою отримання напівцелюлози, що позитивно впливає на якість готового паперу.

Висновки. Досліджено використання лужного середовища та технологічних параметрів на делігніфікацію січки стебел ріпаку та основні характеристики напівфабрикатів. Встановлено, що за виходом і ступенем провару січки отримано напівфабрикати високого виходу в межах 69-88 %. Показано позитивний вплив підвищення температури з 80 до 120 °С та використання каталізатора на фізико-механічні показники отриманих напівфабрикатів. Підвищення витрат активного луку в межах від 12 до 14 % в од. Na₂O від маси абс. сух. в меншій мірі впливають на показники якості напівфабрикатів. Встановлено, що натронно-содовим способом варіння січки ріпаку, отримано напівфабрикати, які в композиції з макулатурою марки МС-5Б за паперотворними та фізико-механічними властивостями задовольняють норми стандарту паперу для гофрування марки Б-3.

Література.

1. Юдицкая, М. Берегите лес. Бумага и жизнь. 2005, 5(59), с 42-44.
2. Mazhari, S. M.; Mousavi, S. Z.; Hosseini, H.; Resalati S.; Mahdavi E. Rasooly Garmaroody. Journal of Cleaner Production. 2013, Vol.52, p 420–424.
- 3.Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т.І. Сырьё и производство полуфабрикатов. Ч.2. Производство полуфабрикатов. Осипов, П. С., Гаврилиди, Е.А., Ред.; Политехника: СПб., 2003, 633 с.
4. Li, M.; Wang, L.; Li D.; Cheng Y.-L. Adhikari Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp. Carbohydrate Polymers. 2014, Vol. 102, pp 136-143.
5. Черьопкіна, Р.І.; Кушмітько, О.В.; Черняк, А.М. Нейтрально-сульфітна делігніфікація соломи ріпаку. Вісник Нац. Технік. Ун-ту України «КПІ». 2012, 1 (9), с 94-97.
6. Торгашов, В. И.; Герт, Е. В.; Зубец, О. В.; Капуцкий, Ф. Н. Получение и бумагообразующие свойства целлюлозы из стеблей рапса и сои. Вестник БГУ. 2008, Сер. 2, 2, с 12-20.
- 7.Черёпкина, Р.И. Эффективность использования рапсовой целлюлозы. Вісник

References.

1. Yuditskaya, M. (2005). Beregite les. [Take care of the forest]. Bumaga i zhizn', 5(59), 42-44 [in Ukrainian].
2. Mazhari, S.M., Mousavi, S.Z., Hossein, H., Resalati, S., Mahdavi, E. (2013). Rasooly Garmaroody Journal of Cleaner Production, 52, p 420-424 [in American].
3. Akim, L. E., Burov, A. S., Evstigneev, E. I., Mironova, T. Ya., Puzyrev, Filatov, B. N. S. S. (2003). Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3 t. T.I. Syr'ye i proizvodstvo polufabrikatov. Ch.2. Proizvodstvo polufabrikatov. [Pulp and paper technology. T.I. Raw materials and production of semi-finished products. Part 2. Production of semi-finished products]. [in Russian].
4. Li, M., Wang, L., Li, D., Cheng, Y.-L. (2014) Adhikari Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp. Carbohydrate Polymers, 102, 136-143 [in American].
5. Cheropkina, R.I., Kushmitko, O.V., Cherniak, A.M. (2012). Neitralno-sulfitna delihnifikatsiia solomy ripaku [Neutral-sulfite delignification of rapeseed straw]. Visnyk Nats. Tekhnik. Un-tu Ukrainy «KPI», 1 (9), 94-97 [in Ukrainian].
6. Torgashov, V. I., Gert, E. V., Zubets, O. V., Kaputskiy, F. N. (2008). Poluchenie i bumagoobrazuyushchie svoystva tsellyulozy iz stebley rapsa i soi. [Receiving and paper-forming properties of cellulose from rape and soybean stalks]. Vestnyk BHU, 2(2), 12-20 [in Russian].
7. Cherepkina, R. I. (2014). Effektivnost' ispol'zovaniya rapsovoy tsellyulozy. [The efficiency of the use of

Нац. техн. ун-ту України «КПІ». 2014, 1(12), с. 96-100.

8. Диагностические признаки недревесных растительных и химических волокон. Москалёва, В. Е.; Брянцева, З. Е. и др.; Зотова-Спановская, Н. П., Ред.; Лесная промышленность: Москва, 1981. 120 с.

9. Кларк, Дж. Технология целлюлозы. Лесная промышленность: Москва, 1983. 456 с.

10. Test Methods. Atlanta. Georgia. Tappi press. 2004.

11. ДСТУ 7798:2015. Папір для гофрування. Технічні умови. Київ: Будстандарт, 2016, 12.

rapeseed pulp]. Visnik Nac. tehn. un-tu Ukraini «KPI». 1(12), 96-100 [in Russian].

8. Moskaleva, V. E., Bryantseva, Z. E. (Ads.). (1981). Diagnosticheskie priznaki nedrevesnykh rastitel'nykh i khimicheskikh volokon. [Diagnostic signs of non-woody plant and chemical fibers]. Zotova-Spanovskaja, N. P. (Ad.). [in Russian].

9. Klark, Dzh. (1983). Tekhnologiya tsellyulozy [Pulp technology]. [in Russian].

10. Test Methods. (2004). Tappi press [in American].

11. DSTU 7798:2015. Papir dlia hofruvannia. Tekhnichni umovy. [Corrugated paper. Technical conditions]. Kyiv: Budstandart, 2016, 12 [in Ukrainian].

CHEROPKINA ROMANIA

Cheropkina.r@gmail.com

Associate Professor, assistant professor of the department of Ecology and plant polymer technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9022-1576>

Researcher ID: L-2005-2017

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

Department of Ecology and Plant Polymers Technology

IRINA DEYKUN

ir.d2615@gmail.com

Associate Professor, assistant professor of the department of Ecology and plant polymer technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7481-4144>

Researcher ID: 55062459700

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

IRINA TREMBUS

tivkpi@gmail.com

Associate Professor, assistant professor of the department of Ecology and plant polymer technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7481-4144>

Researcher ID: 55227349800

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ПОЛУФАБРИКАТЫ ИЗ НЕДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БУМАГИ
ЧЕРЁПКИНА Р.И., ТРЕМБУС И.В., ДЕЙКУН И.М.**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Цель. Основной целью научной работы является исследование технологических параметров экологически чистого способа делигнификации недревесного сырья с получением волокнистых полуфабрикатов для производства упаковочных видов бумаги.

Методика. Для исследования использовали стебли рапса, натронно-содовый варочный раствор, катализатор антрахинон. Варку сечки проводили в стальных автоклавах, которые опускали в глицериновую баню. Использовано стандартные методики определения показателей качества (выхода и содержания остаточного лигнина) недревесного волокнистого полуфабриката. В качестве математического метода обработки данных использовали метод обобщенного приведенного градиента. Лабораторные образцы отливок волокнистых полуфабрикатов и бумаги изготавливали на листоотливном аппарате ЛА-2, механические показатели образцов определяли согласно стандартных методик с использованием соответствующих приборов.

Результаты. Доказана целесообразность использования стеблей рапса для переработки на волокнистые полуфабрикаты в условиях щелочной среды. Установлено, что наибольшее влияние на делигнификацию сырья имеет повышение температуры варки с 80 до 120 °С и использование катализатора антрахинона. Показано, что полученные полуфабрикаты из рапса имеют достаточные бумагообразующие свойства и в композиции с макулатурой марки МС 5Б пригодны для использования в производстве бумаги для гофрирования марки Б-3.

Научная новизна работы обусловлена экологичностью процесса переработки отходов аграрного производства в качестве альтернативного сырья для получения волокнистых полуфабрикатов при низких температурах варки. На примере стеблей рапса исследовано влияние

технологических параметров на показатели качества полуфабрикатов и с помощью методов математической обработки эксперимента определено оптимальное соотношение волокнистый полуфабрикат/макулатура, при котором показатели прочности бумаги для гофрирования будут соответствовать нормам стандарта.

Практическая значимость. Приведенные результаты исследований показывают целесообразность использования отходов масличных культур для переработки на волокнистые полуфабрикаты, с целью расширения сырьевой базы картонно-бумажного производства.

Ключевые слова: стебли рапса, делигнификация, натронно-содовая варка, катализатор, физико-механические показатели, бумага для гофрирования.

FIRST STUFF FROM NON-WOODEN RAW MATERIALS FOR PAPER PRODUCTION

CHEREPKINA R.I., TREMBUS I.V., DEYKUN I.M.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

Purpose. The main objectives of scientific work is to study the technological parameters of the sodium hydroxide method of delignification of non-wood raw materials and production of fibrous first stuff for the manufacturing of packaging types of paper.

Methodology. For the research, rapeseed stalks, sodium hydroxide cooking, anthraquinone catalyst were used. The brews were cooked in steel autoclaves, which were lowered into a glycerin bath. Standard methods for the determination of the quality indicators (yield and residual lignin content) of non-wood fiber first stuff were used. As a mathematical data processing method, the generalized reduced gradient method was used. Laboratory samples of castings of fibrous first stuff and paper were made on a LA-2 sheet-making apparatus, the mechanical parameters of the outturn sheet were determined according to the standard methods using appropriate instruments.

Results. The expediency of using rapeseed stalks for processing of fibrous first stuff under alkaline conditions has been proven. It was found that the greatest influence on the delignification of raw materials has the raise of cooking temperature from 80 to 120 °C and the use of the anthraquinone catalyst. It has been shown that the obtained rapeseed first stuff have sufficient paper-forming properties and are suitable for use in the production of MS 5B brand paper for the use in the production of fluting paper or board of B-3 grade.

The scientific novelty of the work is due to the environmental friendliness of the agrowaste processing as an alternative raw material for the production of fibrous first stuff at low cooking temperatures. Using rapeseed stalks as an example, the influence of technological parameters on the quality indicators of first stuff was studied. Using the mathematical methods of the processing of experiment data, the optimal ratio of fibrous first stuff/waste paper at which the strength indicators of fluting paper or board will meet the standards was determined.

Practical significance. Research results has shown the expediency of using oilseed wastes for processing of fibrous first stuff, with the aim of expanding the raw material base of cardboard and paper production.

Key words: rapeseed stalks, delignification, sodium hydroxide-soda cooking, catalyst, physical and mechanical properties, fluting paper or board.