

УДК 677.027.4:628.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/27>**Коваль М.Г.**<https://orcid.org/0000-0001-9680-8052>

Черкаський державний технологічний університет

Ящук Л.Б.<https://orcid.org/0000-0001-8975-851X>

Черкаський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЇ ВИТРАТ ПРЯМИХ БАРВНИКІВ ПРИ РЕЦИКЛІНГУ КОНЦЕНТРОВАНОЇ СТІЧНОЇ ВОДИ В ПРОЦЕСІ ФАРБУВАННЯ БАВОВНЯНИХ ТКАНИН

Текстильна промисловість є одним із забруднювачів води. Серед основних забруднювачів виділяють синтетичні барвники, що використовуються в технології фарбування тканин. Актуальним та важливим є створення та впровадження ефективних технологій щодо повторного використання стічних вод, які можуть бути якісною вторинною сировиною, й зменшення споживання дорогих барвників, що приведе до екологічності та економічності підприємств, зменшуючи одночасно екологічне навантаження на навколишнє середовище. У статті розглянуто дослідження економії витрат прямих барвників (Прямого червоного світлостійкого, Прямого синього Direct B2RL, Прямого жовтого світлостійкого К) в технології фарбування бавовняних тканин Бязь (арт. 3461) та Віскоза (арт. 3324) з повторним використанням стічної води. Визначено, що концентрована стічна вода, одержана безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії внаслідок залпових скидів, містить в середньому у своєму складі до 40 % прямих барвників, може бути якісним вторинним ресурсом та повторно використана (рециклінг) в технології фарбування бавовняних тканин. Математичний розрахунок витрат прямих барвників в технології фарбування тканини з використанням стічної води здійснювався з врахуванням та порівнянням вартості двох проходів (циклів) фарбування (першого – власне фарбування тканини з утворенням концентрованої стічної води та другого – фарбування із використанням концентрованої стічної води) на об'єм фарбувальної ванни 800 дм³ (за технологічними умовами діючого фарбувального виробництва ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат», м. Черкаси, Україна) на 1200 п.м. бавовняних тканин. Обраховано, що економія витрат барвника Прямого червоного світлостійкого при фарбуванні 1200 п.м. тканини становить для тканини Бязь 26,05%, для тканини Віскоза 33,3%; барвника Прямого синього Direct B2RL для тканини Бязь 25,46%, для тканини Віскоза 15,52%; барвника Прямого жовтого світлостійкого К для тканини Бязь 48,16%, для тканини Віскоза 24,24%.

Ключові слова: фарбувальне виробництво, концентрована стічна вода, прями барвники, бязь, віскоза, економія витрат.

Постановка проблеми. Швидке зростання індустріалізації та урбанізації в останні десятиліття суттєво збільшило світовий попит на воду, що призвело до серйозного її забруднення. Текстильна промисловість стала головним джерелом забруднення води, їхні стічні води підвищують каламутність води та знижують фотосинтез і рівень розчиненого кисню [1, 2]. Очікується, що попит на прісну воду для фарбувальних операцій у текстильній промисловості ще більше зростатиме, враховуючи щорічний темп зростання ринку моди та одягу на рівні 4 % до 2030 року [3]. Серед різних забруднювачів виділяються синте-

тичні барвники, що використовуються в технологічних процесах фарбування та набивання тканин і становлять серйозну екологічну проблему через їхню хімічно стабільну ароматичну структуру та високу стійкість до біодеградації, що робить їх стійкими у водних середовищах [4-6]. Кількість барвників, що застосовується на об'єм обробки текстилю, значно вища для темних та яскравих кольорів, що значно впливає на загальне їх виробництво та використання [7]. Тож, актуальним є створення технологій фарбування та набивання тканин, які забезпечать підвищення ефективності використання барвників і допоміжних хімікатів,

© Коваль М.Г., Ящук Л.Б., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



збільшення продуктивності за рахунок оборотних процесів, економічне зменшення витрат барвників та інших матеріалів, зменшення викидів та екологічного впливу на довкілля.

Фарбування у текстильній промисловості потребує великих обсягів прісної води, що створює труднощі з обробкою та створює стічні води з високим органічним навантаженням, що важко очищати і спричиняє високі витрати на очищення. Кількість споживаної води залежить від процесу фарбування та типів тканин, що випускаються. Загалом близько 200л води використовується для виготовлення 1кг тканини [8]. Встановлено, що в процесах, пов'язаних із фарбуванням тканини, 38% води використовується під час відбілювання, 16% при фарбуванні, 8% для набивання, 14% в котельнях для нагріву, 24% для інших технологічних потреб [9].

Текстильна промисловість використовує сотні тисяч синтетичних барвників для комерційно доступних фарбувальних тканин із оціночною річною виробничою потужністю 7×10^5 тонн [10]. Більшість текстильних барвників, що виробляються і використовуються для фарбування тканин – це азобарвники, які становлять понад 70% ($\square 9$ мільйонів тонн) від загального виробництва всіх барвників [11]. Це викликає необхідність у створенні нових технологій, які б забезпечували економію водних ресурсів, дороговартісних текстильних барвників та зменшували б екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Надзвичайно важливим у конкурентній текстильній промисловості є оптимізація операційної ефективності та ресурсозбереження. Важливим компонентом витрат у текстильному виробництві, особливо у фарбуванні, є споживання води та барвників. Тому, актуальним та критично важливим як для економічної життєздатності текстильних підприємств, так і для екологічності їхніх виробництв є створення та впровадження ефективних технологій щодо зменшення споживання дороговартісних барвників, зокрема в технології фарбування тканин. Зменшення кількості використання барвників не лише зменшить економічні показники собівартості пофарбованої тканини, а й мінімізує хімічне навантаження на утворені стічні води, зменшивши екологічний вплив на водну екосистему.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Над проблемою мінімізації витрат барвників та води, використанням стічної води, як оборотного ресурсу, в технології фарбування тканини працювали вчені багатьох країн. У роботі [12] науковці

Хоке Р.У., Джаліл М.А., Хоссайн С., Хан А.Н. (Hoque R.U., Jalil MA., Hossain S., Khan A.N.) запропонували модифікацію процесу, яка переробляє воду, використану для нейтралізації та промивання, на другому етапі фарбування. Ця перероблена вода використовується на четвертому етапі, ефективно зменшуючи загальне споживання води до 104 літрів на кілограм тканини, таким чином економивши 16 літрів на кілограм без додаткових інвестицій. Впровадження цього екологічно чистого підходу може не лише суттєво зменшити споживання води та генерацію стічних вод, а й мінімізувати виробничі витрати, зменшити потребу в дорогих об'єктах очищення води та управління стічних вод.

У статті [13] «Відновлення та повторне використання фарбувальних ванн для текстилю» (Textile Dyebath Reconstitution and Reuse) обговорюється створення технології відновлення та повторного використання відпрацьованих розчинів фарбувальних ванн у текстильній промисловості. Ця технологія була продемонстрована у виробничих умовах на великій килимовій фабриці на південному сході США під час фарбування синтетичних килимів. Впроваджена технологія дозволила вирішити ряд проблем: зміну рецептури барвників однієї групи для фарбування багатьох відтінків; повторне використання фарбувальних ванн в рамках звичайного виробничого графіка; виробництво високоякісної продукції з використанням перероблених фарбувальних ванн; адаптація технології повторного використання фарбувальних ванн до стандартної технології фарбування на фабриці. Результатом впровадженої технології є скорочення викидів забруднюючих речовин та зменшення використання води на 25-50%. Повторне використання фарбувальних ванн, за прогнозами, могло б заощадити 180000 доларів США на рік, якби половина ванн на комбінаті була переобладнана для повторного використання.

Дослідники з Бразилії Чіарелло Л.М., Міттерштайнер М., Сезар де Жезус П., Андреаус Дж., Барселлос І. (Chiarello L.M., Mittersteiner M., Cesar de Jesus P., Andreaus J., Barcellos I.) [14] експериментальним шляхом визначали кількість циклів повторного використання залишкових фарбувальних ванн від реактивного фарбування бавовни, попередньо ферментативно оброблених пероксидазою хрону. Така обробка привела до видалення кольору стічних вод на 99%, що дозволило їх подальше повторне використання з економією близько 200-600л води на партію фарбування 200кг бавовняної тканини.

З метою мінімізації витрат тепла та енергії на процес фарбування бавовняної тканини прямими барвниками, дослідники з Індії у роботі «Процес мінімізації витрат тепла та енергії для прямого фарбування бавовняної тканини триетаноламіном» (A cost minimization process of heat and energy consumption for direct dyeing of cotton fabric coloration with triethanolamine) [15] запропонували замість натрій карбонату використовувати триетаноламін у рецептурі фарбувальної ванни з низькою (30°C), середньою (60°C) та високою (90°C) температурами фарбування. В результаті дослідження, пофарбовані зразки бавовняної тканини порівнювали із зразками, пофарбованими за звичайною технологією. За результатами, сила кольору (K/S) та кольорова відмінність були прийнятними в порівнянні з традиційним процесом фарбування при високій температурі з натрій карбонатом. Вартість низькотемпературного фарбування була зведена до мінімуму 2,24 рупій порівняно з вартістю фарбування з натрій карбонатом при високій температурі.

Іспанські вчені Бусіо В., Гарсія-Хіменес М., Віласека М., Лопес-Грімая В., Креспі М., Гутьєрес-Бузан С. (Buscio V., García-Jiménez M., Vilaseca M., López-Grimau V., Crespi M., Gutiérrez-Bouzán C.) [16] пропонують повторно використовувати стічну воду фарбувального виробництва, попередньо очищуючи її за допомогою нанофільтраційних мембран Hydracore10 і Hydracore50. Знебарвлені та очищені стоки були повторно використані в нових процесах фарбування. Пофарбовані тканини оцінювалися з точки зору оригінального фарбування. Було визначено, що відмінності в кольорі знаходяться в діапазоні сприйняття.

У роботі [3] «Переробка стічних вод від фарбування текстилю за допомогою озонування: екологічно сталий підхід до зменшення споживання прісної води та хімікатів, а також зниження експлуатаційних витрат» (Recycling textile dyeing effluent through ozonation: An environmentally sustainable approach for reducing freshwater and chemical consumption and lowering operational costs) науковці з Індії займалися переробкою стічних вод фарбувального виробництва шляхом її озонування. В ході дослідження було виявлено значну економію при фарбуванні реактивними (активними) барвниками обробленими стічними водами, зокрема, на 60 % зниження споживання прісної води та 75% у споживанні солі, як додаткового реагента, порівняно з традиційним фарбуванням прісноводною водою.

Науковці з Китаю Лу С., Лю Л., Лю Р., Чень Ц. (Lu X., Liu L., Liu R., Chen J.) [17] досліджували

пілотну станцію з біологічними очисними системами та мембранною технологією рекультивациі стічних вод. Результати показали, що середня ефективність видалення кольору, мутності становила відповідно близько 94,5% і 92,9%. Загальна вартість рекультивациі стічних вод становила приблизно 0,25 долара США/м³ з урахуванням початкових виробничих витрат. Якість очищених стічних вод задовольняла вимогу якості води для фарбування та обробки, за винятком світлого забарвлення.

У роботі [18] «Водозберігаючий процес фарбування: сталий підхід до фарбування бавовняної тканини у вихлопних газах» (Water-Saving Dyeing Process: A Sustainable Approach for Exhaust Dyeing of Cotton Fabric) описано впровадження інноваційного процесу економії води для фарбування бавовняних тканин реактивними барвниками. Традиційні методи фарбування текстилю споживають приблизно 120 літрів прісної води на кілограм бавовняної тканини, що сприяє деградації навколишнього середовища. Вченими запропоновано модифікацію процесу, під час якого переробляють воду, використану для нейтралізації та промивання, на другому етапі фарбування, ефективно зменшуючи загальне споживання води до 104 літрів на кілограм тканини. Впровадження цього екологічно чистого підходу може не лише суттєво зменшити споживання води та генерацію стічних вод, а й зменшити потребу в дорогих об'єктах очищення води та управління стічними водами.

Постановка завдання. Метою досліджень є математичне обрахування економії витрат прямих барвників шляхом порівняння вартості рецептур фарбування бавовняних тканин за базовою технологією реального фарбувального виробництва та новою технологією з використанням концентрованої стічної води.

Виклад основного матеріалу. Відомо [19], що традиційні технології фарбування текстильних матеріалів пов'язані як зі споживанням матеріальних та енергетичних ресурсів, так і з утворенням відходів у вигляді стічних вод. Ці технології мають основний недолік – утилізації підлягають значні обсяги стічної води, що містять у своєму складі органічні та токсичні хімічні речовини, що входять до складу фіксаторів, мийних засобів, барвників і солей, і тому є найбільш забруднюючими серед усіх промислових відходів [20-22].

Концентрована стічна вода, одержана безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії внаслідок залпових скидів, може бути якісною вторинною сировиною

та повторно бути використаною в технології фарбування текстильних матеріалів. Стоки, що виділяються з текстильного процесу фарбування, мають складний характер з високою лужністю, концентрацією електролітів і глибоко забарвлені за рахунок великого вмісту барвника. Практичним шляхом досліджено [23], що середній вміст текстильних барвників у концентрованій стічній воді такий: дисперсних барвників – 39%, реактивних барвників – до 45%. При фарбуванні прямими барвниками стічні води містять близько 43% барвника разом зі значною кількістю електроліту та лугу.

Дослідження щодо можливості фарбування бавовняних тканин прямими барвниками Прямим червоним світлостійким, Прямим синім Direct B2RL, Прямим жовтим світлостійким К із повторним використанням концентрованих стічних вод, що містять прямі барвники, виконані в реальних виробничих умовах ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» («ЧШК», м. Черкаси, Україна) та описані в роботах [24, 25]. За новою технологією була створена нова рецептура фарбувальної ванни, яка включала в себе концентровану стічну воду та розраховану кількість барвника. Колірні характеристики пофарбованих зразків тканин, представлені в табл. 1, вказують на можливість повторного використання концентрованої стічної води в технології фарбування прямими барвниками. Допуски прийнятності ПрАТ «ЧШК» для досліджуваних зразків (у порівнянні з виробничими еталонними): відхилення інтенсивності забарвлення до 5%, світлості (DL), відтінків Da (червоно-зеленого) і Db (жовто-синього) до ± 2 .

Для визначення маси залишкового барвника у стічній воді та маси барвника, яку необхідно додати до стічної води для утворення нового технологічного розчину (фарбувальної ванни) використовували закон Бугера-Ламберта-Бера та значення молярної концентрації досліджуваних розчинів барвників. Маса барвника, яка додавалася до концентрованої стічної води, вираховувалася математично і ґрунтувалася на спектрофотометричних дослідженнях технологічних фарбувальних розчинів та одержаних концентрованих стічних вод [24, 25]. Результати математичних розрахунків та вміст прямих барвників у фарбувальній ванні та утвореній концентрованій стічній воді наведені в таблиці 2.

Рецептура для нових фарбувальних розчинів розраховувалася математично. Вона складається із 3% попередньо розвареного розчину барвника (за технологічним режимом ПрАТ «ЧШК») і доданої концентрованої стічної до загального об'єму фарбувальної машини. Склад нових технологічних розчинів наведений в таблиці 3.

Виробнича фарбувально-роликова машина періодичної дії типу «Jigger» (Vald Henriksen, Нідерланди) за один прохід фарбує 1200 погонних метрів (п.м.) тканини.

Розрахунок витрат прямих барвників в технології фарбування тканини з використанням стічної води здійснювався з врахуванням та порівнянням вартості двох проходів (циклів) фарбування (першого – власне фарбування тканини з утворенням концентрованої стічної води та другого- фарбування із використанням концентрованої стічної води). Результати розрахунків наведені в таблицях 4 і 5.

Таблиця 1

Колірні характеристики пофарбованих тканин прямими барвниками з використанням концентрованої стічної води порівняно з базовою технологією ПрАТ «ЧШК», яка є еталоном

Барвник	Тканина	Світлість DL	Відтінок (червоно-зелений) Da	Відтінок (жовто-синій) Db	Кольорова відмінність DE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталону (100%)
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	-0,1 темніший	+2,22 червоніший	-0,96 синіший	1,4	99
	Віскоза (арт.3324)	+0,37 світліший	+1,07 червоніший	+0,43 жовтіший	1,22	96,3
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	+0,26 світліший	-0,30 зеленіший	-0,07 синіший	0,41	97,4
	Віскоза (арт.3324)	+0,44 світліший	-0,2 зеленіший	-0,96 синіший	1,2	95,6
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	+0,43 світліший	+0,85 червоніший	+1,1 жовтіший	1,78	95,7
	Віскоза (арт.3324)	+0,48 світліший	+1,62 червоніший	+1,47 жовтіший	1,89	95,2

* Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. DE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами [26, С. 29-32].

Загальна вартість фарбувальної ванни для фарбування за базовою технологією ПрАТ «ЧШК» становить:

$$\Sigma B = BB_n + B_c + B_{cod} + B_o \quad (1)$$

де ΣB – загальна вартість фарбувальної ванни за базовою технологією ПрАТ «ЧШК», грн

BB_n – вартість прямого барвника, грн

B_c – вартість кухонної солі, грн;

B_{cod} – вартість кальцинованої соди, грн

B_o – вартість водопровідної води, грн

За формулою (1) загальна вартість фарбувальної ванни для фарбування барвником Прямим червоним світлостійким за базовою технологією ПрАТ «ЧШК» становить:

$$\Sigma B_{nc} = 2189 \text{ грн} + 300 \text{ грн} + 48 \text{ грн} + 42,5 \text{ грн} = 2580,2 \text{ грн}$$

Вартість барвника прямого червоного світлостійкого, який потрібно додати у стічну воду за новою технологією становить:

$$BB_{nm} = mB_{nc} \cdot BB_{nc}, \quad (2)$$

де BB_{nm} – вартість барвника, яку потрібно додати у фарбувальну ванну за новою технологією, грн;

mB_{nc} – маса барвника Прямого червоного, яку потрібно додати до стічної води за новою технологією, кг;

BB_{nc} – вартість 1кг барвника Прямого червоного світлостійкого, грн.

За рівнянням (2) обраховуємо:

$$BB_{nm} = 4,56 \text{ кг} \cdot 270 \text{ грн} = 1231,2 \text{ грн} \quad (3)$$

Вартість двох проходів фарбування барвником Прямим червоним світлостійким:

$$\Sigma \Phi = BB_{nm} + BB_{om} = 1231,2 \text{ грн} + 2580,2 \text{ грн} = 3811,4 \text{ грн} \quad (4),$$

де $\Sigma \Phi$ – вартість двох проходів фарбування барвником Прямим червоним світлостійким, грн

BB_{nm} – вартість барвника, який потрібно додати за новою технологією із використанням стічної води, грн;

Таблиця 2

Вміст прямих барвників у технологічних фарбувальних розчинах та в одержаній стічній воді (на об'єм розчину фарбувальної ванни 800 дм³)

Барвник	Тканина	Концентрація барвника в технологічному фарбувальному розчині, (моль/дм ³)	Концентрація барвника в стічній воді, (моль/дм ³)	Масова концентрація барвника у стічній воді, %	Маса барвника у стічній воді, кг
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	9,23	4,05	43,83	3,55
	Віскоза (арт.3324)	9,23	5,60	60,67	4,83
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	7,97	3,67	46	3,73
	Віскоза (арт.3324)	7,97	1,08	13,6	1,1
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	8,64	0,334	4	0,32
	Віскоза (арт.3324)	8,64	2,57	29,67	2,36

Таблиця 3

Рецептура створеного фарбувального технологічного розчину з використанням концентрованої стічної води (на об'єм розчину фарбувальної ванни 800 дм³)

Барвник	Тканина	Маса барвника, яку потрібно додати до стічної води, кг	Об'єм розчину барвника (3%), який необхідно додати до стічної води, дм ³	Об'єм концентрованої стічної води, дм ³ (для об'єму фарбувального розчину 800дм ³)
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	4,56	67,4	732,6
	Віскоза (арт.3324)	3,14	47,2	752,8
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	4,38	64,8	735,2
	Віскоза (арт.3324)	6,87	103,7	696,3
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	7,78	116,0	684
	Віскоза (арт.3324)	5,6	84,0	716

$B_{\Phi_{nm}}$ – вартість одного проходу фарбування барвником Прямими червоним світлостійким за базовою технологією ПрАТ «ЧШК», грн.

За два проходи фарбування фарбують 2400 п.м. тканини, тому що за 1 прохід фарбують 1200 п.м. тканини. Вартість фарбування 1 п.м. при фарбуванні із стічною водою за новою технологією обраховується із використанням обрахунків (4) і становить:

$$B_{\Phi_{nm}} = \frac{1_{nm} \cdot \sum \Phi}{2400_{nm}} = \frac{1 \cdot 3811,4}{2400} = 1,59 \text{ грн} \quad (5)$$

Вартість фарбування 1200 п.м. тканини за один прохід за новою технологією із використанням концентрованої стічної води становить:

$$B_{\Phi} = B_{\Phi_{nm}} \cdot 1200_{nm} = 1,59 \text{ грн} \cdot 1200_{nm} = 1908 \text{ грн} \quad (6)$$

Економія витрат прямих барвників для фарбування бавовняних тканин за новою рецептурою із використанням концентрованої стічної води розрахована математично за формулою:

$$E = \sum B_{nm} - B_{\Phi} \quad (7)$$

де E – економія витрат використання прямого барвника при фарбуванні бавовняної тканини за

новою рецептурою із концентрованою стічною водою, грн/1200 п.м. тканини;

$\sum B_{nm}$ – вартість витрат прямого барвника за базовою виробничою рецептурою, грн/1200 п.м. тканини;

B_{Φ} – вартість витрат прямого барвника за новою рецептурою із використанням концентрованої стічної води, грн/1200 п.м. тканини.

Для барвника Прямого червоного світлостійкого економія витрат становить:

$$E = 2580,2 \text{ грн} - 1908 \text{ грн} = 672,2 \text{ грн}, \quad \text{що становить } 26,05\% \quad (8)$$

Аналогічно здійснено математичні розрахунки економії витрат барвників Прямого синього Direct B2RL та Прямого жовтого світлостійкого К.

Результати розрахунку вартості фарбування прямими барвниками за базовою та новою технологіями (із використанням концентрованої стічної води) на об'єм фарбувальної ванни 800 дм³ (за умовами ПрАТ «ЧШК») для бавовняної тканини Бязь (арт. 3461) масою 270,17 кг на 1200 п.м. представлена в таблиці 4.

Результати розрахунку вартості фарбування прямими барвниками за базовою та новою техно-

Таблиця 4

Результати розрахунку вартості використання прямих барвників під час фарбування тканини Бязь (арт. 3461)

Компонент за рецептурою фарбування	Кількість компоненту, кг (дм ³)		Вартість компоненту*, грн		
	за базовою рецептурою	за новою рецептурою (із використанням стічної води)	за 1 кг (м ³) (разом із ПДВ)	за базовою технологією	за новою технологією
Прямий червоний світлостійкий					
Барвник	8,11	4,56 (67,4 розв 3%)	270	2189,7	1231,2
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,69	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	732,6	-	-	676,8
Всього:	800	800	389,58	2580,2	1908
Прямий синій Direct B2RL					
Барвник	8,11	3,73 (64,8 розв 3%)	480	3892,80	2102,4
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,69	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	735,2	-	-	1090,43
Всього:	800	800	599,58	4283,3	3192,83
Прямий жовтий світлостійкий К					
Барвник	8,11	0,32 (116 розв 3%)	400	3244	128
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,69	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	684	-	-	1756
Всього:	800	800	519,58	3634,5	1884

* – ціни вказані станом на 1.09.2025 р.

логіями на об'єм фарбувальної ванни 800дм³ (за умовами ПрАТ «ЧШК») для бавовняної тканини Віскоза (арт. 3324) масою 265,62кг на 1200 п.м. представлена в таблиці 5.

Загальні результати економії витрат прямих барвників за базовою та новою технологіями із

використанням концентрованої стічної води представлені на рис. 1. і 2.

Середнє значення економії витрат прямих барвників за новою технологією із використанням концентрованої стічної води для тканини Бязь (арт. 3461) становить 33,2%; для тканини

Таблиця 5

Результати розрахунку вартості використання прямих барвників під час фарбування тканини Віскоза (арт. 3324)

Компонент за рецептурою фарбування	Кількість компоненту, кг (дм ³)		Вартість компоненту*, грн		
	за базовою рецептурою	за новою рецептурою (із використанням стічної води)	за 1 кг (м ³) (разом із ПДВ)	за базовою технологією	за новою технологією
Прямий червоний світлостійкий					
Барвник	7,97	3,14 (47,2 розв 3%)	270	2151,9	847,8
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2		40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12		25	300	-
Вода водопровідна	778,83		54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода	-	752,8	-	-	847,2
Всього:	800	800	389,58	2542,4	1695
Прямий синій Direct B2RL					
Барвник	7,97	6,87 (103,7 розв 3%)	480	3825,6	3297,6
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	
Вода водопровідна	778,83	-	54,58	42,5	
Концентрована стічна вода	-	696,3	-	-	264
Всього:	800	800	599,58	4216,1	3561,6
Прямий жовтий світлостійкий К					
Барвник	7,97	5,6 (84 розв 3%)	400	3188	2240
Кальцинована сода Na ₂ CO ₃	1,2	-	40	48	-
Кухонна сіль NaCl	12	-	25	300	-
Вода водопровідна	778,83	-	54,58	42,5	-
Концентрована стічна вода		716	-	-	472
Всього:		800	519,58	3578,5-	2712

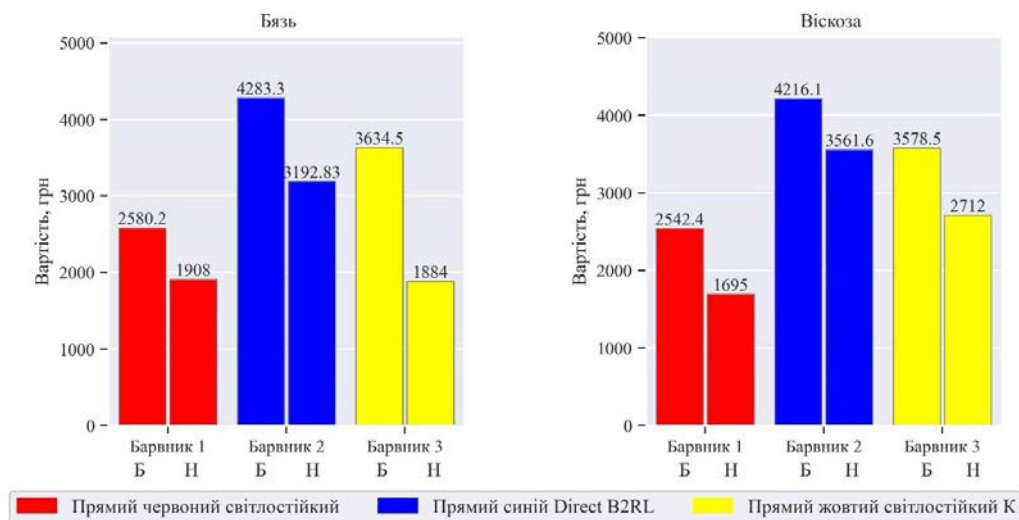


Рис. 1. Вартість фарбувальної ванни з використанням прямих барвників на кожні 1200 п.м. бавовняних тканин Вязь та Віскоза: Б – за базовою технологією ПрАТ «ЧШК»; Н – за новою технологією із використанням концентрованої стічної води

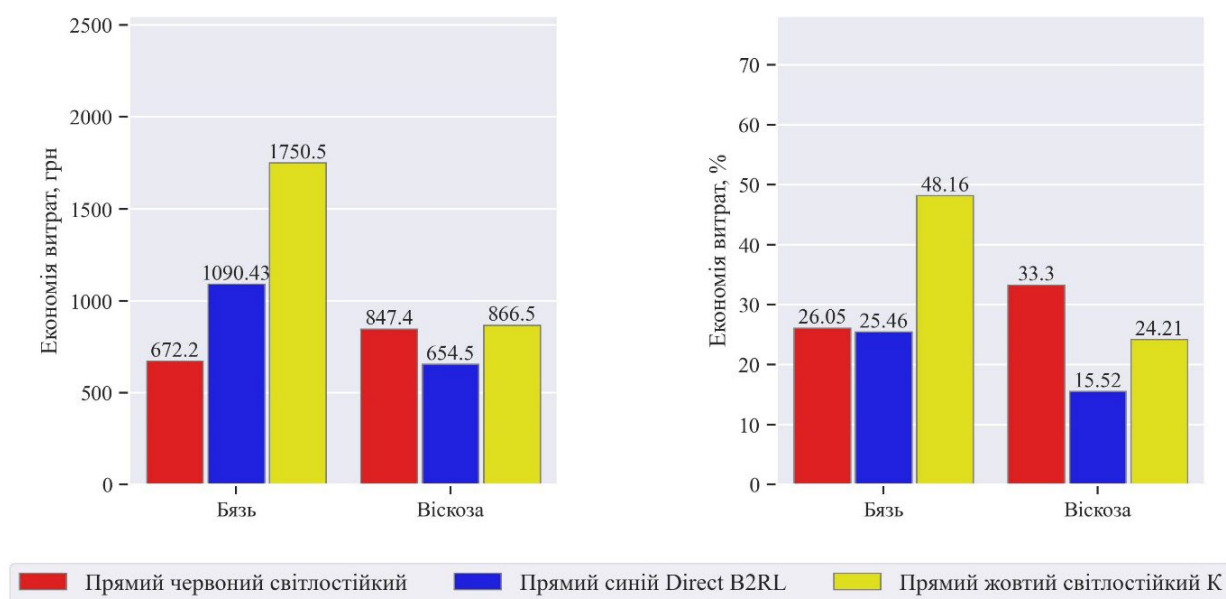


Рис. 2. Економія витрат (в грн та %) прямих барвників в технології фарбування з використанням концентрованої стічної води на кожні 1200 п.м. бавовняної тканини

Віскоза (арт. 3324) – 24,3% на кожні 1200 п.м. тканини.

Висновки. Шляхом експериментальних та математичних обчислень визначено, що концентрована стічна вода, одержана безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії внаслідок залпових скидів, містить в середньому у своєму складі до 40 % прямих барвників і може бути якісним вторинним ресурсом та повторно використана (рециклінг) в технології фарбування бавовняних тканин. Створена рецептура нових технологічних розчинів фарбувальних ванн, яка складалася із 3% попередньо розвареного розчину прямого барвника (за технологічним режимом ПрАТ «ЧШК») і доданої концентрованої

стічної води, забезпечувала стійкість забарвлення пофарбованих бавовняних тканин на рівні еталонних. Математично обраховано, що економія витрат барвника Прямого червоного світлостійкого при фарбуванні 1200 п.м. тканини становить для тканини Бязь 26,05%, для тканини Віскоза 33,3%; барвника Прямого синього Direct B2RL для тканини Бязь 25,46%, для тканини Віскоза 15,52%; барвника Прямого жовтого світлостійкого К для тканини Бязь 48,16%, для тканини Віскоза 24,24%. Середнє значення економії витрат прямих барвників за новою технологією із використанням концентрованої стічної води для тканини Бязь (арт. 3461) становить 33,2%; для тканини Віскоза (арт. 3324) – 24,3% на кожні 1200 п.м. тканини.

Список літератури:

1. Tanaya K., Kumari A., Singh A.K. *et al.* Bioremediation: An Economical Approach for Treatment of Textile Dye Effluents. *Water Air Soil Pollut.* 2024. Vol. 235. № 516. P. 342-361. DOI: 10.1007/s11270-024-07287-y.
2. Kaushik C.P., Ravinder T.N., Kaushik J.K., Gaurav S. Minimization of organic chemical load in direct dyes effluent using low cost adsorbents. *Chemical Engineering Journal.* 2009. Vol. 155, № 1–2. P. 234-240. DOI: 10.1016/j.cej.2009.07.042.
3. Deogaonkar-Baride S., Koli M., Ghuge S.P. Recycling textile dyeing effluent through ozonation: An environmentally sustainable approach for reducing freshwater and chemical consumption and lowering operational costs. *Journal of Cleaner Production.* 2025. Vol. 510, P. 145-164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145641.
4. Kumari S., Singh R., Jahangeer J. *et al.* Innovative Strategies for Dye Removal from Textile Wastewater: A Comprehensive Review of Treatment Approaches and Challenges. *Water Air Soil Pollut.* 2024. Vol. 235, № 720. P. 267-285. DOI: 10.1007/s11270-024-07532-4.
5. Alsuhybani M., Alshehri S., Alquwaizany A. *et al.* Effective adsorption of methylene blue using natural Saudi zeolite as a low-cost sustainable adsorbent. *Scientific Reports.* 2026. Vol. 16, № 211. P. 289-311. DOI: 10.1038/s41598-025-33491-9.
6. Aragaw T.A. A review of dye biodegradation in textile wastewater, challenges due to wastewater characteristics, and the potential of alkaliphiles. *Journal of Hazardous Materials Advances.* 2024. Vol. 16, P. 134-168. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100493.

7. Chemical Economics Handbook. Dyes. 2024. https://www.spglobal.com/content/dam/spglobal/ci/en/documents/products/pdf/CI_0325_Global_CEH_Dyes_Abstract_TOC.pdf (дата звернення 10.03.2026).
8. Ghaly A.E., Ananthashankar R., Alhattab M., Ramakrishnan V.V. Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2014. Vol. 5, №1. P. 1-18. DOI: 10.4172/2157-7048.1000182.
9. Ntuli F., Omoregbe I., Kuipa P., Muzenda E., Belaid M. Characterization of effluent from textile wet finishing operations. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2009*. (San Francisco, USA, 20-22 October). San Francisco, 2009. Vol I, P. 12-18.
10. Aragaw T.A. A review of dye biodegradation in textile wastewater, challenges due to wastewater characteristics, and the potential of alkaliphiles. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2024. Vol. 16, P. 34-48. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100493.
11. Rawat D., Mishra V., Sharma R.S. Detoxification of azo dyes in the context of environmental processes. *Chemosphere*. 2016. Vol. 155, P. 591-605. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.04.068.
12. Hoque R.U., Jalil M.A., Hossain S., Khan A.N. Water-Saving Dyeing Process: A Sustainable Approach for Exhaust Dyeing of Cotton Fabric. *Research Square*. 2023. P. 1-12. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3606656/v1.
13. Bergenthal J, Hendriks R., Tincher W., Eapen J., Tawa A. Textile Dyebath Reconstitution and Reuse. 1984. P. 840-856. <https://p2infohouse.org/ref/31/30328.pdf>.
14. Chiarello L.M., Mittersteiner M., Cesar de Jesus P., Andraeus J., Barcellos I.O. Reuse of enzymatically treated reactive dyeing baths: Evaluation of the number of reuse cycles. *Journal of Cleaner Production*. 2020. P. 267-284. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122033.
15. Hossain A., AK, S. A cost minimization process of heat and energy consumption for direct dyeing of cotton fabric coloration with triethanolamine. *Textile Engineering & Fashion Technology*. 2019. Vol. 5, № 5. P. 235-240. DOI: 10.15406/jteft.2019.05.00207.
16. Buscio V., García-Jiménez M., Vilaseca M., López-Grimau V., Crespi M., Gutiérrez-Bouzán C. Reuse of Textile Dyeing Effluents Treated with Coupled Nanofiltration and Electrochemical Processes. *Academic Open Access Publishing*. 2016. Vol. 9, № 6. P. 490-512. DOI: 10.3390/ma9060490.
17. Lu X., Liu L., Liu R., Chen J. Textile wastewater reuse as an alternative water source for dyeing and finishing processes: A case study. *Desalination*. 2010. Vol. 258, № 1-3. P. 229-232. DOI: 10.1016/j.desal.2010.04.002.
18. Reza-Ul-Hoque Md., Jalil M.A., Hossain S., Khan A.N. Water-Saving Dyeing Process: A Sustainable Approach for Exhaust Dyeing of Cotton Fabric. *Research Square*. 2023. P. 1-12, DOI: 10.21203/rs.3.rs-3606656/v1. <https://www.researchsquare.com/article/rs-3606656/v1>.
19. Романенко Н.Г. Екологічна оптимізація процесів фарбування. *Вісник Херсонського державного технічного університету*. 1998. №3 (3), С. 337-339.
20. Yaseen D.A., Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. Volume 16, P. 1193-1226. DOI: 10.1007/s13762-018-2130-z.
21. Bijoy M. Dyeing of Cotton With Direct Dye. 2021. <https://www.textilepad.com/2021/08/dyeing-of-cotton-with-direct-dye.html> (дата звернення 11.03.2026).
22. Maheshwari K., Agrawal M. Gupta A.B. Dye Pollution in Water and Wastewater. *Novel Materials for Dye-containing Wastewater Treatment*. 2021. P. 1–25. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-2892-4_1. (дата звернення 11.03.2026).
23. Коваль М.Г. Планування та організація експериментальних досліджень циклічного використання ресурсів у технології фарбування текстильних матеріалів (на прикладі дисперсного темно-синього барвника Z). *Наукові записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. № 6, Т. 33 (72), С. 203-209. DOI: 10.32782/2663-5941/2022.6/32.
24. Koval M.G., Kosogina I.V. Results of experimental studies on the reuse of concentrated wastewater in the process of dyeing cotton fabrics with direct dyes. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. № 31(4). С. 805-815 DOI: 10.15421/jchemtech.v31i4.285962.
25. Koval M.G. Development of dyeing technology and creation of a basic technological scheme for the process of reusing concentrated wastewater (on the example, reducing the consumption of direct Yellow lightfast dye K). *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. № 32(4). P. 1119-1128. DOI: 10.15421/jchemtech.v32i4.309831.
26. Gaurav S., Raja B. Digital Color Imaging Handbook. 2003. https://books.google.com.ua/books?id=OxIBqY67rl0C&pg=PA31&vq=1.42&dq=jnd+gaurav+sharma&source=gbs_search_s&sig=vresXi1emghh1Jq57hr2R6cVXI&redir_esc=y#v=onepage&q=1.42&f=false ISBN 084930900X. (дата звернення 12.03.2026).

Koval M.G., Yashchuk L.B. A STUDY OF COST SAVINGS FROM DIRECT DYES IN THE RECYCLING OF CONCENTRATED WASTEWATER DURING THE DYEING OF COTTON FABRICS

The textile industry is one of the major sources of water pollution. Among the primary pollutants are synthetic dyes used in fabric dyeing processes. It is both timely and important to develop and implement effective technologies for the reuse of wastewater, which can serve as high-quality secondary raw materials, and to reduce the consumption of expensive dyes. This will enhance the environmental sustainability and cost-effectiveness of enterprises while simultaneously reducing the environmental impact on the surrounding ecosystem. This article examines a study on the reduction of direct dye consumption (Direct Red Lightfast, Direct Blue B2RL, Direct Yellow Lightfast K) in the dyeing of cotton fabrics such as Calico (item 3461) and viscose (item 3324) using wastewater reuse. It was determined that concentrated wastewater obtained immediately after the fabric dyeing process from batch-type equipment due to batch discharges contains, on average, up to 40% of direct dyes in its composition, can serve as a high-quality secondary resource, and can be reused (recycled) in the dyeing technology of cotton fabrics.

The mathematical calculation of direct dye consumption in the fabric dyeing process using wastewater was performed by taking into account and comparing the costs of two dyeing passes (cycles)—the first being the actual dyeing of the fabric, which produces concentrated wastewater, and the second being dyeing using concentrated wastewater – for a dye bath volume of 800 dm³ (according to the technological conditions of the existing dyeing production at PJSC “Cherkasy Silk Mill,” Cherkasy, Ukraine) for 1,200 running meters of cotton fabrics. It was calculated that the savings in Direct Red Lightfast dye consumption when dyeing 1,200 running meters of fabric amount to 26.05% for calico fabric and 33.3% for viscose fabric; Direct Blue B2RL dye for calico fabric is 25.46%, for viscose fabric 15.52%; Direct Yellow Lightfast K dye for calico fabric is 48.16%, for viscose fabric 24.24%.

Keywords: *dyeing industry, concentrated wastewater, direct dyes, calico, viscose, cost savings.*

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026