АНОТАЦІЯ

Кожевніков С. В. **Розроблення методу оптимізації циклу перероблення відходів на прикладі ПВХ-віконних конструкцій. -** Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 18 Виробництво та технології за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища. - Київський національний університет будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розв’язанню науково-прикладного завдання обґрунтованого вибору технології перероблення демонтованих ПВХ-вікон та повернення придатної полімерної фракції у виробництво. Дослідження поєднує порівняльне оцінювання технологій за екологічними критеріями, аналіз життєвого циклу матеріалу та розрахунок екологічних і економічних наслідків його вторинного використання. Запропонований підхід спрямований на збереження матеріального ресурсу, зменшення обсягів відходів і зниження навантаження на довкілля.

Актуальність роботи зумовлена накопиченням полімерних відходів у будівельній галузі, заміною застарілих віконних конструкцій та потребою в ресурсоефективному відновленні України. Демонтовані ПВХ-вікна містять матеріал, придатний до перероблення, проте змішування з іншими будівельними відходами та недостатня організація збирання ускладнюють його повернення у виробництво. Водночас наявність хлору в структурі полімеру, стабілізаторів і сторонніх домішок потребує контролю складу сировини, технологічних режимів та безпечності отриманого матеріалу.

Мета дослідження полягає в розробленні та обґрунтуванні підходу до вибору технології перероблення демонтованих ПВХ-вікон за екологічними критеріями та формуванні механізму повернення придатного вторинного ПВХ у виробництво з оцінкою екологічних та економічних наслідків. Для досягнення мети проаналізовано інформаційні джерела й досвід управління ПВХ-відходами, порівняно способи перероблення, сформовано індекс

екологічної ефективності та виконано сценарні розрахунки повернення матеріалу у виробничий цикл.

Об’єктом дослідження є процеси утворення, збирання, перероблення та повторного використання відходів ПВХ-профілів. Предмет дослідження становлять методи й технології їх вторинного перероблення, екологічні та економічні аспекти використання, організаційні механізми й нормативне забезпечення. Використано аналіз і синтез наукових джерел, порівняльний та структурно-системний аналіз, оцінку життєвого циклу (ОЖЦ, LCA), багатокритеріальне оцінювання, математичне і сценарне моделювання та методи економічного аналізу.

У першому розділі узагальнено теоретичні засади вторинного перероблення ПВХ-профілів, властивості матеріалу та джерела утворення його відходів. Розмежовано виробничі залишки та відходи після експлуатації, які відрізняються однорідністю, забрудненням і складністю підготовки. Аналіз складу демонтованих вікон обґрунтував необхідність відокремлення скла, металевого армування, фурнітури й ущільнювачів перед переробленням полімерної фракції. Це дає змогу пов’язати вибір технології з фактичними характеристиками сировини.

У другому розділі досліджено організацію перероблення ПВХ в Україні та країнах Європейського Союзу. Показано значення взаємодії демонтажних підприємств, пунктів збирання, сортувальних центрів і переробників. На підставі аналізу наукових публікацій, нормативних документів та галузевих матеріалів обґрунтовано потребу розвивати окреме збирання демонтованих вікон, облік матеріальних потоків і контроль якості вторинної сировини. Визначено напрями адаптації організаційного досвіду ЄС до українських умов.

У третьому розділі сформовано п’ятикритеріальну еколого-технологічну модель порівняння механічного, хімічного та термічного способів перероблення. Оцінювання охоплює вуглецевий слід, питоме енергоспоживання, токсичність, кількість залишкових відходів і частку

матеріалу, придатного до повторного використання. Узгоджена п’ятибальна шкала дає змогу зіставляти альтернативи за однаковими критеріями та визначати їхні переваги й обмеження для конкретного складу відходів.

Для відносно чистої й однорідної ПВХ-фракції механічний спосіб у порівняльній оцінці отримав по 5 балів за вуглецевим слідом та енергоспоживанням. За прийнятою шкалою цим оцінкам відповідають значення до 0,5 кг CO_2/кг матеріалу та до 0,6 кВт·год/кг відповідно. Оцінка повторного використання становить 4 бали та відповідає діапазону 75–89 %. Результати характеризують умови проведеного порівняння; для забрудненої або неоднорідної сировини необхідна окрема перевірка придатності технології.

Удосконалено математичну модель оцінювання технологій із введенням індексу екологічної ефективності (ІЕЕ). Показники з різними одиницями вимірювання приводяться до порівнюваної шкали та поєднуються з урахуванням вагових коефіцієнтів. Метод ураховує різний напрям бажаної зміни критеріїв: зменшення вуглецевого сліду, енергоспоживання, токсичності й залишкових відходів та збільшення частки повторного використання. Це забезпечує кількісне порівняння технологій за визначених вихідних даних.

У розрахунковому прикладі ваги вуглецевого сліду, енергоспоживання, токсичності, залишкових відходів і повторного використання становлять відповідно 0,30; 0,20; 0,15; 0,15 та 0,20. Вуглецевий слід і енерговитрати разом формують 50 % підсумкової оцінки. Такий розподіл відображає прийняті пріоритети порівняння; його застосування до конкретного підприємства потребує обґрунтування вихідних даних та ваг. ІЕЕ використовується для вибору серед технологій, допустимих за складом сировини та вимогами екологічної безпеки.

Запропоновано послідовність вибору технології: визначення характеристик партії ПВХ-відходів, перевірка технологічної придатності та екологічних обмежень, формування переліку допустимих способів і їх

порівняння за IEE. Це дозволяє враховувати відмінності між партіями, а також пояснювати отримане ранжування через значення окремих критеріїв. Сформовані правила можуть бути використані як основа майбутньої експертної системи підтримки рішень щодо перероблення ПВХ.

Аналіз життєвого циклу показав необхідність ураховувати вплив виробництва первинного полімеру та ресурсні витрати вторинного циклу. У наведеному в роботі розрахунковому порівнянні питомі енерговитрати становлять 1,5 кВт·год/кг для вторинного циклу та 2,5 кВт·год/кг для первинного, що відповідає зниженню на 40 %. Ці значення належать до окремого сценарного порівняння циклів і не ототожнюються з порогами п’ятибальної оцінки технологій. Екологічний ефект залежить від підготовки матеріалу, джерел енергії та меж оцінювання.

Визначено умови екологічно безпечного перероблення: очищення профілю, контроль температурного режиму, хлорвмісних викидів і складу стабілізаторів. Обмеження термічної деградації ПВХ та контроль домішок мають супроводжувати вибір технології. Розглянуто також використання біо-ПВХ, внутрішнього рециклінгу виробничих відходів і коекструзії з вторинним матеріалом. Їхні переваги пов’язані із заміщенням первинної сировини та скороченням відходів, а кількісний ефект має оцінюватися для конкретного виробничого процесу.

У четвертому розділі запропоновано механізм повернення демонтованих ПВХ-вікон у виробництво. Він охоплює збирання конструкцій, розділення на матеріальні фракції, очищення ПВХ, вибір способу перероблення, контроль якості вторинної сировини та її використання в нових виробах. Бізнес-модель передбачає взаємодію підприємств, що збирають демонтовані вікна, сортувальних і переробних підприємств та виробників продукції. Її економічна доцільність залежить від сталого надходження сировини, витрат на підготовку й перероблення та договорів на збут.

Для сценарію перероблення 10 000 т ПВХ-фракції на рік за виходу придатного матеріалу 80 % визначено можливість отримання 8 000 т

вторинного ПВХ. Обсяг вхідного потоку стосується полімерної фракції, а не загальної маси вікон разом зі склом і металом. Заміщення первинного полімеру цією кількістю вторинного матеріалу може забезпечити скорочення викидів на 12 000–16 000 т CO_2-екв. на рік за прийнятих розрахункових умов. Результати характеризують потенціал механізму, а не фактично виміряний річний ефект його промислового застосування.

За умовної ціни реалізації 840 євро за тонну продаж 8 000 т вторинного ПВХ відповідає валовій виручці 6,72 млн євро на рік. Цей показник відображає потенційний дохід від реалізації матеріалу. Прибуток визначається після врахування витрат на збирання, транспортування, сортування, перероблення, контроль якості та збут. Економічні результати дають змогу оцінювати доцільність організації вторинного циклу за конкретних виробничих і договірних умов.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше сформовано п’ятикритеріальну еколого-технологічну модель порівняльного аналізу механічного, хімічного та термічного способів перероблення ПВХ-відходів за єдиною узгодженою п’ятибальною шкалою. Вона дозволяє системно пов’язати кількісні індикатори вуглецевого сліду, питомого енергоспоживання на рециклінг та інших показників екологічної безпеки;

Удосконалено математичну модель технології перероблення полімерних відходів шляхом введення індексу екологічної ефективності (IEE), що дає змогу здійснювати її багатокритеріальну оптимізацію;

Набули подальшого розвитку теоретичні засади циркулярної економіки та «зеленого будівництва» у сфері управління будівельними полімерними відходами.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення результатів дослідження полягає у розробленні комплексного механізму повернення демонтованих ПВХ-вікон у виробничий

цикл. Цей механізм охоплює етапи збирання вікон, розділення їх на матеріальні фракції, глибокого очищення ПВХ, вибору технології перероблення, контролю якості вторинного матеріалу та його безпосереднього використання в нових виробах. Запропонований підхід дає змогу гнучко обирати оптимальний спосіб перероблення залежно від морфологічного складу й ступеня забруднення конкретної партії відходів.

На підставі розрахункового сценарію перероблення 10 000 т ПВХ-фракції на рік доведено технологічну можливість повернення у виробництво 8 000 т вторинного ПВХ. Розрахункове скорочення викидів завдяки заміщенню первинного полімеру становить 12 000–16 000 т CO_2-екв. на рік, що підтверджує високий потенціал збереження матеріальних ресурсів та мінімізації впливу будівельної індустрії на довкілля.

Доведено економічну доцільність впровадження запропонованих рішень: за прийнятої розрахункової ціни 840 євро за тонну вторинного ПВХ, реалізація 8 000 т матеріалу здатна забезпечити 6,72 млн євро валової виручки на рік. Фактичний прибуток підприємства формуватиметься після вирахування операційних витрат на збирання, перевезення, перероблення, контроль якості та збут.

Окрім того, розроблено проєкт національного стандарту «Вторинний ПВХ (RePVC). Технічні вимоги та методи контролю», який регламентує підходи до перевірки якості й простежуваності партій матеріалу, а також підготовлено науково обґрунтовані пропозиції щодо внесення змін до чинного законодавства України у сфері управління ПВХ-відходами.

Ключові слова: ПВХ-віконні конструкції, ПВХ-відходи, вторинний ПВХ, вторинна переробка, рециклінг, життєвий цикл, оцінка життєвого циклу (ОЖЦ, LCA), екологічна безпека, індекс екологічної ефективності, вуглецевий слід, енергоефективність, циркулярна економіка, зелене будівництво, ESG-підхід, відновлення України.

ABSTRACT

Kozhevnikov S. V. Development of a Method for Optimising the Waste Recycling Cycle Using PVC Window Structures as a Case Study. — Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 18 Production and Technologies, specialty 183 Environmental Protection Technologies. — Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation addresses the scientific and applied task of selecting a suitable technology for recycling dismantled PVC windows and returning the usable polymer fraction to production. The research combines a comparative assessment of technologies against environmental criteria, an analysis of the material life cycle, and calculations of the environmental and economic consequences of using recycled PVC. The proposed approach aims to conserve material resources, reduce waste quantities, and decrease environmental impacts.

The relevance of the study arises from the accumulation of polymer waste in the construction sector, the replacement of outdated window structures, and the need for resource-efficient reconstruction in Ukraine. Dismantled PVC windows contain recyclable material, but mixing them with other construction waste and inadequate collection arrangements hinder its return to production. Chlorine in the polymer structure, stabilisers, and contaminants also require control of feedstock composition, processing conditions, and the safety of the resulting material.

The aim is to develop and substantiate an approach to selecting a technology for recycling dismantled PVC windows against environmental criteria and to establish a mechanism for returning usable recycled PVC to production, with an assessment of environmental and economic consequences. To achieve this aim, information sources and PVC waste management practices were analysed, recycling methods were compared, an environmental efficiency index was developed, and scenarios for returning material to the production cycle were calculated.

The object of the research comprises the processes of PVC profile waste generation, collection, recycling, and reuse. The subject covers recycling methods and technologies, their environmental and economic aspects, organisational mechanisms, and regulatory provisions. The methods include analysis and synthesis of scientific sources, comparative and structural systems analysis, life cycle assessment (LCA), multicriteria assessment, mathematical and scenario modelling, and economic analysis.

Chapter One summarises the theoretical foundations of PVC profile recycling, material properties, and sources of waste generation. It distinguishes production scrap from post-consumer waste, which differ in homogeneity, contamination, and preparation requirements. An analysis of dismantled window composition substantiated the need to remove glass, metal reinforcement, fittings, and seals before recycling the polymer fraction. This links technology selection to the actual characteristics of the feedstock.

Chapter Two examines the organisation of PVC recycling in Ukraine and European Union countries. It demonstrates the importance of cooperation between dismantling companies, collection points, sorting centres, and recyclers. An analysis of scientific publications, regulatory documents, and industry information substantiated the need for separate collection of dismantled windows, recording material flows, and controlling recycled feedstock quality. Directions for adapting European organisational experience to Ukrainian conditions were identified.

Chapter Three develops a five-criterion environmental and technological model for comparing mechanical, chemical, and thermal recycling methods. The assessment covers carbon footprint, specific energy consumption, toxicity, residual waste quantities, and the share of material suitable for reuse. A harmonised five-point scale enables comparison against the same criteria and identification of the advantages and limitations of each alternative for a particular waste composition.

For a relatively clean and homogeneous PVC fraction, mechanical recycling received five points for both carbon footprint and energy consumption in the comparative assessment. On the adopted scale, these scores correspond to values of

up to 0.5 kg CO_2/kg of material and up to 0.6 kWh/kg, respectively. The reuse score was four points, corresponding to a range of 75–89%. These results describe the conditions of the comparison; contaminated or heterogeneous feedstock requires a separate assessment of technological suitability.

The mathematical model for assessing technologies was improved by introducing an environmental efficiency index (EEI). Indicators expressed in different units are converted to a comparable scale and combined using weighting coefficients. The method accounts for different desirable directions of change: lower carbon footprint, energy consumption, toxicity, and residual waste, alongside a higher share of material reuse. This provides a quantitative comparison of technologies for specified input data.

In the calculation example, the weights for carbon footprint, energy consumption, toxicity, residual waste, and reuse are 0.30, 0.20, 0.15, 0.15, and 0.20, respectively. Carbon footprint and energy consumption jointly account for 50% of the overall score. This distribution reflects the adopted assessment priorities; its use at a particular enterprise requires justification of both the input data and the weights. The EEI is used to select among technologies that are admissible given feedstock composition and environmental safety requirements.

A sequence for selecting a technology was proposed: determining the characteristics of a PVC waste batch, checking technological suitability and environmental constraints, identifying admissible methods, and comparing them using the EEI. This allows differences between batches to be considered and the resulting ranking to be explained through individual criterion values. The rules may serve as a basis for a future expert decision-support system for PVC recycling.

Life cycle analysis demonstrated the need to account for the impacts of virgin polymer production and the resource requirements of the secondary cycle. In the scenario comparison presented in the dissertation, specific energy consumption is 1.5 kWh/kg for the secondary cycle and 2.5 kWh/kg for the primary cycle, a reduction of 40%. These values relate to a separate comparison of cycles and are distinct from the thresholds of the five-point technology assessment. The

environmental effect depends on material preparation, energy sources, and assessment boundaries.

Conditions for environmentally safe processing were identified, including profile cleaning, temperature control, monitoring chlorine-containing emissions, and controlling stabiliser composition. Limiting PVC thermal degradation and managing contaminants must accompany technology selection. The study also considers bio-based PVC, internal recycling of production scrap, and co-extrusion with recycled material. Their advantages relate to the substitution of virgin feedstock and waste reduction, while quantitative effects must be assessed for a specific production process.

Chapter Four proposes a mechanism for returning dismantled PVC windows to production. It includes collecting window structures, separating material fractions, cleaning PVC, selecting a recycling method, controlling recycled feedstock quality, and using it in new products. The business model links companies collecting dismantled windows, sorting and recycling enterprises, and product manufacturers. Its economic feasibility depends on a consistent feedstock supply, preparation and processing costs, and sales agreements.

A scenario involving the processing of 10,000 tonnes of PVC fraction per year with an 80% usable material yield indicates the potential to obtain 8,000 tonnes of recycled PVC. The input quantity refers to the polymer fraction, rather than the total mass of windows including glass and metal. Replacing virgin polymer with this quantity of recycled material could reduce emissions by 12,000–16,000 tonnes of CO_2 equivalent annually under the adopted calculation conditions. These results describe the potential of the mechanism rather than a measured annual effect of industrial operation.

At an assumed selling price of EUR 840 per tonne, sales of 8,000 tonnes of recycled PVC would generate gross annual revenue of EUR 6.72 million. This indicator represents potential revenue from material sales. Profit is determined after accounting for collection, transport, sorting, recycling, quality control, and sales

costs. The economic calculations enable assessment of the feasibility of a secondary cycle under specific production and contractual conditions.

Scientific novelty of the results

A five-criterion ecological-technological model has been developed for the first time to compare mechanical, chemical, and thermal methods of PVC waste processing using a unified, consistent five-point scale. This model enables a systematic link between quantitative indicators—such as carbon footprint, specific energy consumption for recycling, and other environmental safety metrics;

The mathematical model for polymer waste processing technology has been improved through the introduction of an environmental efficiency index (EEI), enabling multi-criteria optimization of the process;

The theoretical foundations of the circular economy and "green building" have been further advanced within the context of managing polymer construction waste.

Practical significance of the results

The practical significance of the research results lies in the development of a comprehensive mechanism for reintegrating dismantled PVC windows into the production cycle. This mechanism encompasses the stages of window collection, separation into material fractions, deep cleaning of the PVC, selection of recycling technology, quality control of the secondary material, and its direct use in new products. The proposed approach allows for the flexible selection of the optimal recycling method based on the morphological composition and contamination level of a specific waste batch.

Based on a calculated scenario involving the recycling of 10,000 tonnes of PVC fraction annually, the technical feasibility of returning 8,000 tonnes of secondary PVC to production has been demonstrated. The estimated reduction in emissions resulting from the substitution of virgin polymer amounts to 12,000–16,000 tonnes of CO_2-equivalent per year, confirming the significant potential for conserving material resources and minimizing the construction industry's environmental impact.

The economic viability of implementing the proposed solutions has been established: at an assumed price of €840 per tonne of secondary PVC, the sale of 8,000 tonnes of material could generate €6.72 million in annual gross revenue. The enterprise's actual profit would be determined after deducting operating costs associated with collection, transportation, processing, quality control, and sales.

Furthermore, a draft national standard titled "Secondary PVC (RePVC)" has been developed. ...Technical Requirements and Control Methods," which regulates approaches to verifying the quality and traceability of material batches, and scientifically grounded proposals have been prepared for amending current Ukrainian legislation regarding PVC waste management.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Кожевніков С. В. Аналіз проблематики вторинного перероблення віконних ПВХ профілів. Український та європейський досвід. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2023. № 5. С. 59-63. https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202305/1-08
2. Кожевніков С. В., Березницька Ю. О. Сталий підхід до проєктування віконних профілів для зменшення впливу на довкілля. Екологічна безпека та природокористування. 2025. Т. 55, № 3. С. 163-176. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.163-176
3. Кожевніков С. В., Березницька Ю. О. Удосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів: напрями та очікувані ефекти. Екологічна безпека та природокористування. 2026. Т. 58, № 2. С. 31-42. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.31-42
4. Кожевніков С. В. Пропозиції щодо створення державної програми розвитку переробки ПВХ. Екологічна безпека та природокористування. 2026. Т. 59, № 3. С. 18–30. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.3.18-30
5. Кожевніков С., Ткаченко Т. Інноваційні технології світлопрозорих конструкцій для природного освітлення приміщень. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2026. Вип. 58. С. 23–33. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.58.23-33

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Кожевніков С. В., Березницька Ю. О. Важлива роль ПВХ-ресайклінгу у зменшенні викидів CO_2 та вуглецевого сліду. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») (Київ, 16–17 квітня 2024 р.). Київ : КНУБА, 2024. С. 399-402.
7. Кожевніков С. В. Головні тенденції ПВХ ресайклінгу. Енергія. Ресурси. Екологія : робоча програма та тези доповідей V Міжнародної науково-

практичної конференції (Київ, 27–29 листопада 2024 р.). Київ, 2024. С. 101-102.

8. Kozhevnikov S., Bereznytska Y. PVC Profiles Recycling Technologies as Part of the European Sustainability Concept. Climate Services: Science and Education : Proceedings of the Second International Research-to-Practice Conference (Odesa, 16–18 April 2025). Odesa : Odesa I. I. Mechnikov National University, 2025. P. 37–39.

9. Кожевніков С. В., Березницька Ю. О. Сталий дизайн продукту як важливий критерій використання ресайклінгу у ПВХ профілях для покращення впливу на навколишнє середовище. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») (Київ, 13-14 травня 2025 р.). Київ : КНУБА, 2025. С. 139-143.

10. Березницька Ю. О., Кожевніков С. В. Проблеми використання рециклятy та біо-ПВХ й перспективи їх розв’язання. Build Master Class 2025 : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 26-28 листопада 2025 р.). Київ : КНУБА, 2025. С. 205-206.

11. Кожевніков С. В., Березницька Ю. О. Екологічно безпечні технології переробки ПВХ-профілів в промисловості: інтеграційний підхід. Енергія. Ресурси. Екологія : робоча програма та тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 3-5 грудня 2025 р.). Київ, 2025. С. 108-109.

12. Кожевніков С. В. Удосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») (Київ, 20-21 травня 2026 р.). Київ : КНУБА, 2026. С. 179-183.