

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Факультет економіки та екології моря
Кафедра екології та природоохоронних технологій

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри

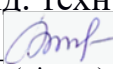
« 8 »  12 2025 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

на тему: **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕТАЛОПЛАСТИКОВИХ ВІКОН НА НАВКОЛИШНЄ
СЕРЕДОВИЩЕ**

Виконав: студент 6281м групи
 Бардадим М. О.
(підпис)

Керівник роботи: доцент кафедри
екології та природоохоронних
технологій

канд. техн. наук, доцент
 Ремешевська І. В.
(підпис)

Миколаїв – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Факультет економіки та екології моря
Кафедра екології та природоохоронних технологій
Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища».
Освітня програма Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
“ 8 ” 12 20 25 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту Бардадим Максим Олександрович
(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження впливу процесу виробництва та експлуатації металопластикових вікон на навколишнє середовище
Керівник роботи канд. техн наук, доцент Ремешевська І. В.
Затверджені наказом ректора №1312-уч від « 31 » 10 2025 року
2. Термін подання роботи: 08.12.2025 р.
3. Вихідні дані по роботі: літературні та наукові джерела інформації, законодавча база України, статистичні данні
4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) Розділ 1. Загальна характеристика віконних профілів із полівінілхлориду. Розділ 2. Аналіз виробничої діяльності підприємств із виробництва металопластикових вікон. Розділ 3. Методи оцінки впливу на довкілля ReCiPe MidPoint та EndPoint. Розділ 4. Оцінка життєвого циклу та енергетична оцінка виробництва та використання вікон у житлових будівлях. Розділ 5. Аналіз економічної доцільності заміни вікон житлових будівель на вікна з полівінілхлоридних профілів (ПВХ). Розділ 6. Аналіз потенційних загроз у виробничих процесах виготовлення металопластикових вікон на підприємстві ViGrand (м. Миколаїв).
5. Перелік презентаційних матеріалів Основні компоненти ПВХ, що використовується для виробництва металопластикових вікон. Технологічна схема виробництва профільних виробів з НПВХ. Рівень виробництва віконних конструкцій в Україні (2021-2025р.р.). Порівняльна характеристика провідних виробників металопластикових вікон в Україні. Виробнича лінія виготовлення світлопрозорих конструкцій із ПВХ-профілів ViGrand. Основне обладнання та обсяги виробництва ViGrand. Основні шкідливі речовини, які можуть потрапляти до навколишнього середовища під час виробництва металопластикових (ПВХ) вікон. Характеристика об'єктів оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях. Межі виробничої системи для вікон. Категорій впливу в методах MidPoint і EndPoint. Компоненти досліджуваних вікон. Вплив на довкілля під час виробництва вікон у трьох категоріях шкідливого впливу. Екологічний баланс виробництва та експлуатації ПВХ-вікон у порівнянні з алюмінієвими вікнами.

Розділ	Прізвище, ініціали та посадаконсультанта	завдання видав	завдання прийняв
P5	Літвак О. А.		
P6	Маринець О. М.		

2.1.1. Дата видачі завдання 27.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
P1	Загальна характеристика віконних профілів із полівінілхлориду	08.12.2025 р.	
P2	Аналіз виробничої діяльності підприємств із виробництва металопластикових вікон	08.12.2025 р.	
P3	Методи оцінки впливу на довкілля ReCiPe MidPoint та EndPoint	08.12.2025 р.	
P4	Оцінка життєвого циклу та енергетична оцінка виробництва та використання вікон у житлових будівлях	08.12.2025 р.	
P5	Аналіз економічної доцільності заміни вікон житлових будівель на вікна з полівінілхлоридних профілів (ПВХ)	08.12.2025 р.	
P6	Аналіз потенційних загроз у виробничих процесах виготовлення металопластикових вікон на підприємстві ViGrand (м. Миколаїв)	08.12.2025 р.	

Студент  М. О. Бардадим
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  І. В. Ремешевська
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

на магістерську роботу за темою «Дослідження впливу процесу виробництва та експлуатації металопластикових вікон на навколишнє середовище»

Бардадим М. О.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» з технології захисту довкілля – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв. – 2025.

Випускна кваліфікаційна робота присвячена дослідженню впливу процесу виробництва та експлуатації металопластикових вікон на навколишнє середовище.

У першому розділі роботи наведено загальну характеристику полівінілхлориду та описано процес виробництва віконних ПВХ-профілів, включно з аналізом рецептур композицій і роллю різних добавок у підвищенні їх технічних та експлуатаційних властивостей.

У другому розділі проаналізовано виробничу діяльність підприємств із виготовлення металопластикових вікон в Україні, а також детально охарактеризовано процеси на прикладі підприємства ViGrand (м. Миколаїв).

У третьому розділі розглянуто методи оцінки впливу на довкілля ReCiPe MidPoint та EndPoint, описано етапи оцінки показників та джерела даних для розрахунку екологічного впливу виробництва та використання віконних систем.

У четвертому розділі проведено оцінку життєвого циклу та енергетичну оцінку виробництва і використання вікон у житлових будівлях, визначено об'єкти оцінки, описано етапи аналізу та наведено результати оцінки впливу на довкілля.

У п'ятому розділі проаналізовано економічну доцільність заміни старих вікон на металопластикові ПВХ-конструкції, розглянуто енергоефективність сучасних віконних систем, економічні переваги модернізації та соціально-економічні і екологічні аспекти термомодернізації житлових будівель.

У шостому розділі здійснено аналіз потенційних загроз у виробничих процесах виготовлення металопластикових вікон на прикладі підприємства ViGrand (м. Миколаїв), оцінено стан охорони праці та проведено моделювання травмонебезпечних ситуацій під час зварювання деталей.

Ключові слова: металопластикові вікна, полівінілхлорид, ПВХ-профілі, екологічний вплив, життєвий цикл, енергоефективність, економічна доцільність.

ANNOTATION

for the master's thesis on the topic «Research on the Environmental Impact of the Production and Operation of Metal-Plastic Windows »

Barbadym M. O.

Master's thesis for obtaining the degree of higher education «Master» in Environmental Protection Technology – Admiral Makarov National University of Shipbuilding. – Mykolaiv. – 2025.

The master's thesis is devoted to studying the impact of the Production and Operation of Metal-Plastic Windows.

The first chapter provides a general overview of polyvinyl chloride and describes the production process of PVC window profiles, including an analysis of composition recipes and the role of various additives in enhancing their technical and operational properties.

The second chapter analyzes the production activities of enterprises manufacturing PVC windows in Ukraine and provides a detailed description of the processes at the ViGrand enterprise (Mykolaiv).

The third chapter discusses methods for assessing environmental impact using ReCiPe MidPoint and EndPoint approaches, describes the steps for evaluating indicators, and lists data sources for calculating the environmental impact of the production and use of window systems.

The fourth chapter presents a life cycle assessment and energy evaluation of the production and use of windows in residential buildings, identifies assessment objects, describes analysis stages, and presents the results of environmental impact evaluation.

The fifth chapter analyzes the economic feasibility of replacing old windows with PVC window systems, considers the energy efficiency of modern window systems, the economic benefits of modernization, and the socio-economic and environmental aspects of thermal modernization of residential buildings.

The sixth chapter examines potential hazards in the production processes of PVC windows at the ViGrand enterprise (Mykolaiv), evaluates occupational safety, and models injury-prone situations during welding of window components.

Keywords: PVC windows, polyvinyl chloride, PVC profiles, environmental impact, life cycle, energy efficiency, economic feasibility.

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІКОННИХ ПРОФІЛІВ ІЗ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ

1.1 Загальні відомості про ПВХ, що використовується для виробництва металопластикових вікон

1.2 Віконні ПВХ-профілі: загальна характеристика процесу виробництва

1.3 Аналіз рецептури композицій для виготовлення віконних профілів

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ІЗ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛОПЛАСТИКОВИХ ВІКОН

2.1 Аналіз діяльності підприємств із виробництва металопластикових вікон в Україні за 2021–2025 рр.

2.2 Аналіз виробничої діяльності підприємства ViGrand (м. Миколаїв)

2.2 Характеристика виробничого процесу підприємства ViGrand (м. Миколаїв)

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ RECIPE MIDPOINT ТА ENDPOINT

3.1 Історія виникнення методів ReCiPe

3.2 Метод ReCiPe MidPoint

3.3 Метод ReCiPe EndPoint

3.4 Джерела даних для оцінки показників ReCiPe EndPoint

3.5 Покроковий план оцінки показників ReCiPe MidPoint та EndPoint

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІКОН У ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

4.1 Загальні характеристики життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

4.2 Характеристика об'єктів оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

4.3 Етапи оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

4.4 Аналіз результатів оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАМІНИ ВІКОН

ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ВІКНА З ПОЛІВІНІЛХЛОРИДНИХ ПРОФІЛІВ (ПВХ)

5.1 Енергоефективність сучасних віконних систем

5.2 Економічні переваги заміни старих вікон на металопластикові

5.3 Соціально-економічні та екологічні аспекти термомодернізації житлових будівель

РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ ПОТЕНЦІЙНИХ ЗАГРОЗ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛОПЛАСТИКОВИХ ВІКОН НА ПІДПРИЄМСТВІ VIGRANT (М. МИКОЛАЇВ)

6.1 Аналіз стану охорони праці на підприємстві ViGrand (м. Миколаїв)

6.2 Аналіз потенційних загроз у виробничих процесах виготовлення металопластикових виробів

6.3 Моделювання травмонебезпечних ситуацій під час зварювання деталей металопластикових вікон

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

ВСТУП

Металопластикові вікна є одними з найбільш поширених конструкцій у сучасному житловому та комерційному будівництві. Вони поєднують енергоефективність, довговічність та естетичні властивості, що робить їх стандартним рішенням для заміни старих дерев'яних вікон та реалізації програм модернізації житлових будівель. Виробництво таких конструкцій в Україні є важливим напрямом промисловості, що тісно пов'язаний із відновленням житлового фонду, реконструкцією пошкоджених об'єктів, впровадженням програм енергозбереження та підвищенням комфорту мешканців.

Галузь виробництва металопластикових конструкцій демонструє високу адаптивність і здатність швидко реагувати на зміни ринкової кон'юнктури. До 2021 року вона перебувала на етапі стабільного зростання, що було обумовлено будівельним бумом 2017–2021 років та активним розвитком інфраструктури новобудов. Виробництво металопластикових вікон у цей період відзначалося розширенням виробничих потужностей, розвитком дилерських мереж і виходом на зовнішні ринки. Попит на сучасні конструкції був зумовлений їх енергоефективністю, доступністю та довговічністю, що робило їх стандартним рішенням для житлових і комерційних будівель.

Проте у 2022 році галузь зазнала суттєвого негативного впливу через повномасштабне воєнне вторгнення на територію України. Частина підприємств опинилася у зоні бойових дій, деякі виробництва призупинили роботу або були змушені перемістити виробничі потужності до західних регіонів країни. Падіння попиту на новобудови спричинило тимчасове скорочення виробництва, водночас зріс попит на реконструкцію пошкодженого житла. У 2023–2024 роках почалося поступове відновлення обсягів виробництва завдяки програмам відбудови, гуманітарним проектам та підвищенню попиту на енергоощадні рішення. Сьогодні в Україні працює понад

200 компаній, що виготовляють металопластикові вікна та двері, але основну частку ринку забезпечують лише декілька великих підприємств. Лідерами залишаються компанії Steko та Viknar'off, які разом формують понад половину загального виробництва.

Виробництво металопластикових вікон ґрунтується на використанні полівінілхлориду (ПВХ) — термопластичного полімеру, що поєднує високу хімічну та механічну стійкість, довговічність та можливість модифікацій. Хімічна структура ПВХ забезпечує стійкість матеріалу до корозії, впливу вологи, ультрафіолетового випромінювання, а також хімічних реагентів, що робить його придатним для тривалої експлуатації у різних кліматичних умовах. Жорсткий ПВХ використовується для виготовлення рам і стулок, забезпечуючи стабільність конструкцій, а м'який — для ущільнювачів і гнучких елементів, що підвищує герметичність і полегшує монтаж. Для зміцнення великих багатокамерних систем застосовуються армуючі вставки зі сталі або алюмінію.

Багатокамерна структура профілів забезпечує додаткову тепло- і звукоізоляцію, підвищує жорсткість конструкції та робить виробництво більш економічно ефективним. Виробництво ПВХ-профілів здійснюється за технологією екструзії: гранули полімеру змішуються зі стабілізаторами, пластифікаторами та іншими модифікаторами, плавляться у екструдері та формуються у профіль потрібного перерізу. Після охолодження профілі нарізають на необхідні довжини, оснащують армуючими вставками, ущільнювачами і фурнітурою. Такий комплексний підхід забезпечує високу геометричну точність продукції, механічну міцність, ефективну тепло- і звукоізоляцію, а сучасні конструкції відповідають нормам безпечності та екологічним стандартам, дозволяючи використовувати їх у житлових будівлях, дитячих садках та медичних установах.

Актуальність теми магістерської роботи визначається необхідністю комплексного оцінювання впливу виробництва та експлуатації металопластикових вікон на навколишнє середовище. Масове застосування

ПВХ у будівництві, активне використання енергоефективних конструкцій у житловому фонді та плани з модернізації будівель висувають завдання кількісної оцінки життєвого циклу продукції, ідентифікації критичних етапів виробництва, визначення потенційних ризиків для довкілля та здоров'я людини. Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) із застосуванням методів ReCiPe MidPoint та EndPoint дозволяє системно оцінити вплив матеріалів і технологій на довкілля, виявити екологічно критичні стадії та сформулювати рекомендації щодо мінімізації негативного впливу та підвищення енергоефективності.

Виходячи з цього, магістерська робота спрямована на всебічне дослідження процесів виробництва, експлуатації та утилізації металопластикових конструкцій із ПВХ, що є важливим як для розвитку промисловості, так і для підвищення екологічної стійкості будівельного сектору України.

Метою магістерської роботи є дослідження впливу процесів виробництва та експлуатації металопластикових вікон на навколишнє середовище шляхом аналізу складу матеріалів, особливостей виробничої діяльності підприємств, а також проведення оцінки життєвого циклу та енергетичної ефективності.

Об'єкт дослідження: виробничі процеси підприємств із виготовлення металопластикових вікон та їх експлуатація у житлових будівлях.

Предмет дослідження: екологічний вплив виробництва, експлуатації та утилізації металопластикових конструкцій та економічна ефективність їх використання.

Основні завдання роботи:

1. Проаналізувати сучасний стан виробництва металопластикових вікон в Україні та визначити ключові тенденції розвитку галузі.
2. Дослідити технологічні та матеріалознавчі особливості виробництва ПВХ-профілів.

3. Провести оцінку життєвого циклу металопластикових вікон із застосуванням методів ReCiPe MidPoint та EndPoint.

4. Визначити екологічні та економічні аспекти використання металопластикових конструкцій у житлових будівлях.

5. Розробити рекомендації щодо зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення енергоефективності житлових об'єктів.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІКОННИХ ПРОФІЛІВ ІЗ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ

1.1 Загальні відомості про ПВХ, що використовується для виробництва металопластикових вікон

Полівінілхлорид, або ПВХ (PVC — Polyvinyl Chloride), є синтетичним термопластичним полімером, який отримують шляхом радикальної полімеризації вінілхлориду ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$). Хімічна формула повторюваного структурного елемента ПВХ — $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$, де n позначає кількість повторів молекули в макромолекулярному ланцюзі. Атом хлору в структурі полімеру надає матеріалу унікальні властивості: високу хімічну стійкість, стійкість до впливу вологи та ультрафіолетового випромінювання, а також низьку теплопровідність. Ці характеристики роблять ПВХ ідеальним для виготовлення металопластикових вікон, які повинні протистояти атмосферним впливам, перепадам температур, агресивним хімічним речовинам і механічним навантаженням протягом десятків років [1, 2, 5].

Віконні ПВХ-профілі виробляються з жорсткого полімеру для рам і стулок, що забезпечує конструкціям стабільність і довговічність. Для ущільнювачів і гнучких елементів систем застосовується м'який ПВХ, який підвищує герметичність і зручність монтажу. Часто профілі посилюють армуючими вставками зі сталі або алюмінію, що дозволяє виготовляти великі багатокамерні конструкції без ризику деформації. Багатокамерна структура профілів забезпечує додаткову тепло- і звукоізоляцію, підвищує жорсткість конструкції без збільшення товщини матеріалу і одночасно робить виробництво більш економічно ефективним.

Особливістю ПВХ є поєднання хімічної стабільності і фізичних властивостей, які роблять його універсальним матеріалом для будівництва. Завдяки наявності атомів хлору у молекулі ПВХ матеріал володіє високою стійкістю до корозії, гниття та агресивних хімічних середовищ. Він не схильний

до руйнування під впливом кислотних дощів і забрудненого повітря. ПВХ є термопластичним полімером, тобто під впливом тепла його можна формувати у профілі будь-якої конфігурації, а після охолодження матеріал зберігає форму і механічну міцність. Матеріал поєднує високу міцність, стійкість до механічних навантажень і ударів, при цьому залишаючись легким і зручним для обробки [2, 5].

Іншою важливою особливістю є здатність ПВХ модифікуватися за допомогою добавок. Стабілізатори запобігають термічному руйнуванню при екструзії, пластифікатори підвищують еластичність і гнучкість профілів, антипірени знижують горючість, а ультрафіолетові стабілізатори захищають матеріал від руйнування під сонцем. Армування металевими вставками підвищує жорсткість, а модифікатори ударостійкості забезпечують захист від тріщин і механічних пошкоджень. Завдяки такому поєднанню ПВХ-профілі стають надійними, довговічними і здатними витримувати складні експлуатаційні умови.

Технологія виробництва ПВХ-профілів базується на процесі екструзії. Гранули полімеру змішують із стабілізаторами, модифікаторами та іншими добавками і подають у екструдер, де матеріал плавиться і проходить через матрицю, яка надає профілю потрібний переріз. Після формування профіль охолоджують, нарізають на необхідні довжини і оснащують армуючими вставками, ущільнювачами та фурнітурою. Такий комплексний підхід дозволяє отримувати профілі з високою геометричною точністю, відмінною механічною міцністю, ефективною тепло- і звукоізоляцією.

Сучасні ПВХ-профілі відповідають високим екологічним стандартам, не виділяють шкідливих речовин під час експлуатації та можуть використовуватися в житлових будинках, дитячих садках і медичних установах. Можливість фарбування і ламінування, поєднання різних форм і багатокамерної конструкції дозволяють створювати віконні системи, які поєднують естетику і функціональність, а спеціальні добавки гарантують тривалу службу виробів

протягом десяти років.

Таким чином, ПВХ є основним матеріалом для виробництва металопластикових вікон, поєднуючи хімічну стійкість, механічну міцність, гнучкість у дизайні та високу тепло- і звукоізоляцію. Використання стабілізаторів, пластифікаторів, армуючих вставок і інших добавок дозволяє виготовляти сучасні багатокамерні конструкції, які відповідають стандартам енергоефективності, безпеки та комфорту, забезпечуючи тривалу і надійну експлуатацію.

Таблиця 1.1 – Основні компоненти ПВХ, що використовується для виробництва металопластикових вікон [3, 4].

Компонент	Хімічна формула / склад	Основна функція
Полівінілхлорид	$[-CH_2-CHCl-]_n$	Основний полімер, забезпечує міцність, стійкість до вологи та хімічних впливів
Стабілізатори	Ca/Zn або Ba/Cd сполуки	Запобігають термічному руйнуванню під час екструзії та нагрівання
Пластифікатори	Фталати або цитратні ефіри	Підвищують еластичність і гнучкість профілів, особливо ущільнювачів
Армуючі вставки	Сталь або алюміній	Підвищують жорсткість і міцність конструкції
Антипірени	Фосфатні сполуки	Знижують горючість профілю
УФ-стабілізатори	Бензотриазоли, оксibenзони	Захищають матеріал від руйнування під сонячним випромінюванням
Модифікатори ударостійкості	Акрилові або стирольні добавки	Покращують механічну стійкість до ударів і тріщиноутворення

1.2 Віконні ПВХ-профілі: загальна характеристика процесу виробництва

Віконні ПВХ-профілі є одними з найпоширеніших видів профільних виробів, виготовлених із неластифікованого полівінілхлориду, і сертифікуються за ДСТУ Б В.2.7130:2007 [6]. За класифікацією, запропонованою вітчизняними авторами ще у 70-х роках [7], ці профілі належать до складно профільних виробів закритого типу. Хоча ця класифікація залишається актуальною й сьогодні, вона не набула широкого

загальноприйнятого використання.

Як уже зазначалося у попередньому розділі, чистий ПВХ сам по собі непридатний для переробки. Коли в літературі згадують ПВХ у контексті віконних профілів, мають на увазі саме складні композиції на його основі, які можуть містити від 10 до 15 різних компонентів. Найбільш поширеним матеріалом для виробництва жорстких профілів та труб є непластифікований ПВХ (НПВХ), що відзначається гарною стійкістю до атмосферних впливів, помірною механічною міцністю та належить до самозгасаючих матеріалів, як і всі композиції на основі чистого ПВХ. У науковій літературі відсутня чітка межа між термінами «не пластифікований» та «жорсткий» ПВХ: вони можуть використовуватися обидва для матеріалу із вмістом пластифікатора від 2 до 10 мас.ч. [7].

На сьогодні існує велика кількість підприємств, що виробляють профільні системи на основі НПВХ за різними технологічними схемами. Вибір конкретної схеми залежить від багатьох факторів: наявності сировини, типу продукції, кліматичних умов регіону, особливостей виробничого приміщення, рецептури композиції, виду екструзійного обладнання тощо. Незважаючи на різноманітність технологій, основою всіх схем виробництва профілів є одна загальна блок-схема (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва профільних виробів з НПВХ

Процес виготовлення профілів починається зі змішування композиції та її подальшої екструзії. НПВХ може поставлятися у двох видах — порошкоподібному та гранульованому. Це важливий нюанс при виборі екструдера: гранульовані композиції частіше переробляють на одношнекових екструдерах, тоді як порошкоподібні — на двошнекових. Хоча порошок можна обробляти й на одношнековому обладнанні, це призводить до зниження продуктивності [8,10], підвищеної запиленості обладнання та погіршення умов праці, що впливає на якість кінцевої продукції.

Метою як одношнекової, так і двошнекової екструзії є отримання неперервного профілю з фільери, проте принципи переробки істотно відрізняються [9]. У таблиці 1.2 наведено порівняльні характеристики одношнекових та двошнекових екструдерів зі зчіпними шнеками, що обертаються в протилежних напрямках, з нарізкою, яка забезпечує щільне зчеплення витків. Така конструкція дозволяє досягти необхідного тиску розплаву, оптимальної швидкості зсуву матеріалу та мінімального часу перебування ПВХ у циліндрі екструдера.

Таблиця 1.2 – Порівняння одночерв'ячного та двухчерв'ячного екструдерів [9]

Параметр	Двочерв'ячний екструдер	Одночерв'ячний екструдер
Основне призначення	Використовується в профільній екструзії, при змішуванні та реакційно здатних (хімічно активних) матеріалів	Використовується у профільній екструзії, переважно для простих матеріалів
Конструкція шнека та циліндра	Часто застосовується модульна конструкція, що забезпечує більшу гнучкість	Модульна конструкція використовується рідко, гнучкість незначна
Передбачення режиму роботи	Передбачення режиму роботи є достатньо складним	Передбачення режиму роботи є менш складним
Завантаження матеріалу	Гарне завантаження: можна використовувати гранули, порошки, рідини	Задовільне завантаження: використання ковзних добавок може створювати проблеми
Плавлення матеріалу	Гарне плавлення, обумовлене дисперсійним механізмом плавлення твердих матеріалів	Задовільне плавлення, обумовлене суміщенням різних механізмів плавлення
Дистрибуційне змішування	Гарне	Гарне
Диспергуєче змішування	Гарне	Гарне
Дегазація	Гарна дегазація	Задовільна дегазація
Самоочищення	Екструдери зі зчепленими шнеками можуть бути повністю самоочисними	Самоочищення відсутнє: очищується лише циліндр, основа шнека та сторони лопатей залишаються забрудненими
Вартість обладнання	Висока вартість модульного двочерв'ячного екструдера	Відносно невисока вартість

Екструзія неможлива без правильної конструкції екструзійної головки. Вона повинна бути жорсткою, щоб канал не змінював форму під високим тиском розплаву, а деталі, що контактують з матеріалом, — виготовлені зі стійких до корозії металів, наприклад нержавіючої сталі. Середня швидкість течії розплаву через паралельні канали на виході з головки повинна бути однаковою. Для виробництва великих серій профілів використовуються головки обтічної конструкції [7, 9], хоча можливе застосування й брендівих моделей.

У загальних рисах технологічна схема виробництва віконного профілю методом екструзії виглядає так (рис.1.2). Готова композиція за допомогою

вакуумного або шнекового завантажника надходить у бункер екструдера. Вторинний ПВХ подається через спеціальну ємність вакуумним завантажником. Дозування матеріалу в циліндр екструдера здійснюється автоматично. У двошнековому екструдері шнеки обертаються назустріч один одному, забезпечуючи ущільнення, плавлення та гомогенізацію композиції. Виникаючі гази від коркування матеріалу видаляються через вакуумний насос із вбудованим фільтром. Підготовлений розплав видавлюється через фільтрувальну фільтрувальну вставку в вакуумний калібратор, де профіль фіксується спочатку у «сухому» металевому калібраторі, а потім остаточно охолоджується у «вологодому» — ванні з металевими вставками, заповненій водою. Рух профілю забезпечується тягнучим пристроєм, на профіль наноситься маркування, захисна плівка та нарізка відрізків встановленої довжини, після чого готова продукція подається на приймальний стіл.

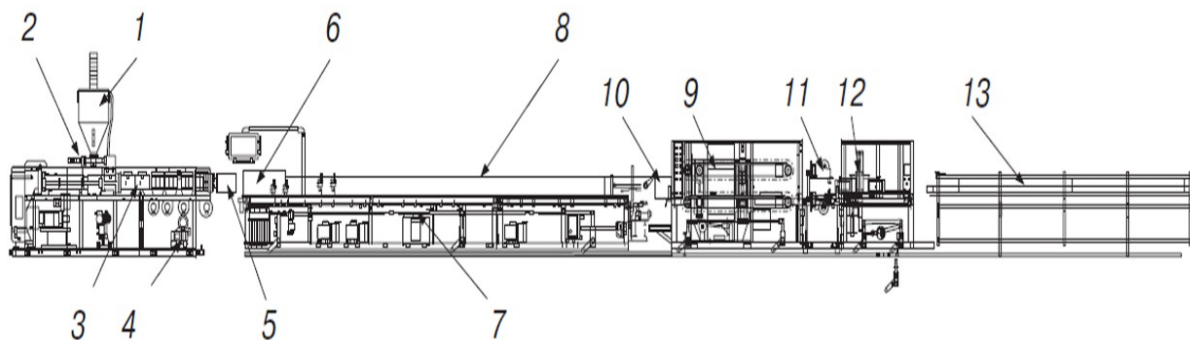


Рисунок 1.2 - Технологічна схема виробництва віконного профілю методом екструзії

1, 6 - бункери; 2 - дозатор; 3 - екструдер; 4 - фільтр; 5 - фільтрувальна вставка; 6 - «сухий» калібратор; 7 - калібраційний стіл; 8 - «вологдий» калібратор; 9 - тягнучий пристрій; 10 - маркувальний пристрій; 11 - пристрій для покриття захисною плівкою; 12 - відрізний пристрій; 13 - приймальний стіл.

Рисунок 1.2 – Технологічна схема виробництва віконного профілю методом екструзії.

1.3 Аналіз рецептури композицій для виготовлення віконних профілів

Як зазначалося раніше, чистий ПВХ непридатний для прямої переробки в жорсткі профілі, тому сировина для виробництва профілів — це складні композиції, що містять до 10–15 різних компонентів. Кожен компонент у складі композиції виконує конкретну функцію: підвищує технологічність переробки, покращує механічні, тепло- і вологостійкі властивості, забезпечує стійкість до ультрафіолетового випромінювання та знижує горючість матеріалу.

Основним компонентом композиції є непластифікований ПВХ (НПВХ). При оцінці його придатності для екструзії враховуються такі характеристики, як молекулярна маса, об'ємна щільність і розподіл часток смоли за розмірами. Об'ємна щільність визначає, скільки полімеру може поміститися у зоні завантаження екструдера, що безпосередньо впливає на продуктивність. Частинки з підвищеним електростатичним зарядом відштовхуються, зменшуючи щільність, тому контроль вологості на поверхні частинок є важливим для стабілізації процесу [13, 17]. Рівномірний розподіл часток за розміром забезпечує оптимальне пакування та рівномірне плавлення композиції, що критично для отримання профілів із точними геометричними параметрами. Наявність невеликої пористості у часток ПВХ дозволяє ефективно абсорбувати рідкі стабілізатори та мастила, що покращує якість кінцевого продукту.

Для виготовлення високоякісних профілів у рецептуру включають такі групи компонентів:

Стабілізатори. Вони запобігають термічній деструкції ПВХ під час екструзії та подальшої обробки. До них належать кальцій-цинкові та барій-кадмієві сполуки. Стабілізатори також підвищують довговічність матеріалу та захищають його від старіння. Крім термостабілізаторів, у композиції можуть бути антиоксиданти, що запобігають окисленню матеріалу, і спеціальні УФ-абсорбери, які захищають профілі від руйнування під сонячним

випромінюванням. Найпоширенішим «класичним» УФ-стабілізатором є діоксид титану (рутіл), який одночасно виконує роль барвника та поглинача ультрафіолету [12-15,17].

Пластифікатори. Хоча НПВХ відносять до жорстких матеріалів, невеликий вміст пластифікатора (2–10 мас. ч.) використовується для полегшення переробки, підвищення еластичності ущільнювачів і зменшення крихкості профілю.

Модифікатори ударостійкості. Ці компоненти дозволяють профілям витримувати механічні навантаження та удари без тріщин і деформацій, що особливо важливо для великих віконних конструкцій.

Лубриканти. Вони забезпечують легке транспортування розплаву через екструдер і фільєру, зменшують тертя і попереджають перегрів матеріалу.

Наповнювачі. Наприклад, крейда або інші мінеральні добавки, використовуються для покращення механічних властивостей, зменшення усадки та підвищення стабільності форми профілю. Дослідження показали, що крейда також позитивно впливає на стійкість профілів до атмосферного впливу [15,17].

Пігменти та барвники. Вони надають профілям потрібний колір і забезпечують рівномірність відтінку по всій довжині профілю.

Кожен виробник підбирає рецептуру під конкретні види продукції та обладнання. Для отримання стабільної продуктивності екструдера важливо, щоб характеристики смоли були однорідними, а показники плавлення не змінювалися між партіями. Невідповідність розміру часток або об'ємної щільності смоли може призвести до нестабільності продуктивності, збільшення припусків при нарізці та перевитрат матеріалу. Наприклад, при річній продуктивності 10 000 т перевитрата композиції через коливання об'ємної щільності може досягати 100 т, що істотно впливає на економіку виробництва.

Таким чином, ретельний підбір компонентів композиції та контроль параметрів

сировини є ключовим для забезпечення високої якості віконних ПВХ-профілів, стабільної продуктивності обладнання та тривалого терміну служби готових виробів.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ІЗ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛОПЛАСТИКОВИХ ВІКОН

2.1 Аналіз діяльності підприємств із виробництва металопластикових вікон в Україні за 2021–2025 рр.

Виробництво металопластикових вікон є одним із ключових напрямів української промисловості, тісно пов'язаним із будівельним сектором, реконструкцією житлового фонду та програмами енергоефективності. Ця галузь пройшла складний шлях розвитку за останні п'ять років — від стабільного зростання до глибокого спаду у 2022 році та подальшого поступового відновлення.

До 2021 року галузь перебувала на етапі сталого зростання. Будівельний бум 2017–2021 рр. сприяв розширенню виробничих потужностей. Металопластикові конструкції, завдяки своїй доступності та енергоефективності, стали стандартом для житлових і комерційних будівель. Українські компанії активно конкурували між собою, розвивали дилерські мережі та освоювали експортні ринки.

Після початку повномасштабного вторгнення в 2022 році ринок зазнав глибокого шоку. Частина виробництв опинилася в зоні бойових дій, багато компаній були змушені тимчасово призупинити роботу або перенести свої потужності на Західну Україну. Зменшився попит на новобудови, натомість зріс попит на реконструкцію пошкодженого житла. У 2023–2024 рр. почалося поступове відновлення — за рахунок програм відбудови, гуманітарних проєктів і збільшення попиту на енергоощадні рішення.

Рівень виробництва віконних конструкцій за останні роки демонструє хвилеподібну динаміку.

Таблиця 2.1 - Рівень виробництва віконних конструкцій в Україні (2021-2025р.р.) [18,24].

Рік	Орієнтовний обсяг виробництва, млн одиниць	Зміна до попереднього року, %	Коментар
2021	4,0–4,2	—	Передвоєнний пік виробництва; стабільний ринок, активне будівництво
2022	2,5–2,8	–35...–40 %	Різке падіння через війну, логістичні розриви, втрату ринків
2023	3,9–4,1	+30...+35 %	Відновлення виробництва, нові ланцюги постачання, попит на відбудову
2024	3,7–3,9	–3...–5 %	Стабілізація після відновлення; зростання частки енергоефективних конструкцій
2025*	4,1–4,4 (прогноз)	+5...+10 %	Потенційне зростання за умови масштабної відбудови країни

*Оцінка на основі прогнозів попиту для програм реконструкції та енергоефективності (2025).

Загалом галузь відновила понад 90 % довоєнних обсягів. Виробництво змістилося від масового нового будівництва до сегменту реконструкції, що вимагає більшої гнучкості, індивідуальних замовлень і коротких виробничих циклів.

Сьогодні в Україні діє понад 200 компаній, які виготовляють металопластикові вікна та двері, але реальних лідерів, що формують основну частку ринку, небагато. Нижче наведено порівняльну характеристику провідних виробників.

Таблиця 2.2 - Порівняльна характеристика провідних виробників металопластикових вікон в Україні [19,13].

Підприємство	Місце знаходження / кількість заводів	Орієнтовна потужність	Орієнтовний обсяг виробництва (2023 р.), млн одиниць	Частка ринку, %	Особливості
Steko	Дніпро (2 заводи), Львів (1 завод)	до 5000 вікон/день (~1,8 млн/рік)	~1,2–1,4	30–35	Найбільший виробник в Україні; власні профільні системи; експорт у ЄС
Viknar'off	Тернопіль, 10 виробничих цехів	до 100000 вікон/місяць (~1,2 млн/рік)	~1,0–1,2	25–30	Високий рівень автоматизації; експорт у 12 країн; виробництво склопакетів
Open Teck	Дніпро	~600 тис. од./рік	~0,5–0,6	10–12	Власне виробництво ПВХ-профілів, вертикальна інтеграція
WDS (Миропласт)	Дніпро	~800 тис. од./рік	~0,6–0,7	12–15	Великий виробник профілів і віконних систем; фокус на енергоефективності
Aluplast Ukraine	Київ	~400 тис. од./рік	~0,3–0,4	7–8	Європейські стандарти, локалізоване виробництво
Інші виробники (сумарно)	—	—	~0,4–0,6	8–10	Регіональні компанії, що працюють у локальних нішах

Дані наведено за відкритими джерелами, корпоративними звітами та галузевими оцінками.

Steko залишається найбільшим гравцем ринку, маючи три заводи й можливість випускати понад 1,5 млн конструкцій на рік. Компанія активно просуває власні профільні системи (Steko S300, S900, R700) і має широку дилерську мережу в Україні та Європі. Вона першою серед українських виробників вийшла на сертифікацію продукції за європейськими нормами енергоефективності.

Viknar'off за обсягами виробництва поступається лише незначно, однак вирізняється високим рівнем автоматизації. Їхні виробничі комплекси займають понад 50 000 м², а щомісячна потужність сягає 100 000 одиниць продукції. Компанія активно розвиває власні лінії склопакетів і фурнітури, що знижує собівартість і залежність від імпорту.

Open Teck і WDS (Миропласт) займають середній сегмент ринку. Вони

фокусуються на виробництві ПВХ-профілів, що дозволяє контролювати якість і витрати по всьому ланцюгу — від профілю до готового вікна. Їхні обсяги стабільні, але дещо менші, ніж у двох лідерів, через орієнтацію на внутрішній ринок.

Aluplast Ukraine — приклад інтеграції європейського бренду у вітчизняну промисловість. Компанія локалізувала частину виробництва, що дозволяє постачати продукцію за нижчими цінами, ніж імпортні аналоги, зберігаючи якість.

Разом ці п'ять компаній формують понад 85 % усього ринку металопластикових вікон України.

За останні п'ять років галузь виробництва металопластикових вікон в Україні зазнала суттєвих трансформацій, які відобразилися як у структурі виробництва, так і в поведінці ринку. Основні тенденції включають технологічну модернізацію підприємств, що дозволяє підвищувати продуктивність та точність виготовлення конструкцій; зростання попиту на енергоефективні рішення, особливо багатокамерні профілі та склопакети з низьким тепловтратами; посилену локалізацію виробництва, що зменшує залежність від імпорту комплектуючих і стабілізує собівартість; а також активний розвиток експортних каналів у країни Європи та регіонів, де українські виробники конкурують за рахунок високої якості та доступних цін. Паралельно спостерігається зміщення попиту з нового будівництва на відновлення пошкодженого житла та реконструкцію існуючих об'єктів, що змінює підходи до виробництва та сервісу.

Узагальнюючи ці тенденції, можна зробити висновок, що галузь демонструє високу адаптивність і здатність відновлюватися навіть після серйозних кризових періодів. Пік виробництва спостерігався у 2021 році (понад 4 млн одиниць), падіння у 2022 році склало близько 35–40 %, а відновлення в 2023–2024 роках стабілізувало обсяги на рівні 3,8–4,0 млн одиниць. Прогноз на 2025 рік передбачає можливе зростання до 4,4 млн одиниць завдяки програмам

післявоєнної відбудови та підвищенню попиту на енергоефективні конструкції. [19, 24]. Лідерами ринку залишаються Steko та Viknar'off, які разом забезпечують понад половину загального виробництва, тоді як середні та малі підприємства утримують нішу індивідуальних та спеціалізованих рішень. У цілому, подальший розвиток галузі буде визначатися здатністю компаній модернізувати виробництво, оптимізувати постачання, виходити на нові ринки та гнучко реагувати на зміни попиту.

2.2 Характеристика виробничої діяльності підприємства ViGrand (м. Миколаїв)

Підприємство **ViGrand**, розташоване у місті Миколаїв за адресою вул. В'ячеслава Чорновола, 8Ж, є одним із провідних виробників металопластикових вікон і дверей в Україні. Компанія спеціалізується на комплексному виготовленні світлопрозорих конструкцій із ПВХ-профілів, алюмінієвих систем, склопакетів, підвіконь і рошетів, а також надає повний спектр послуг із доставки та монтажу готових виробів [25].



Фото 2.1 - Виробнича лінія



Фото 2.2 - Виготовлення вікон

Завод займає загальну площу понад 18 000 м², з яких понад 11 000 м² відведено під виробничі цехи та автоматизовані лінії. Така площа дозволяє підприємству одночасно розміщувати кілька автоматизованих виробничих потоків, зберігати сировину та комплектуючі, а також виготовляти велику кількість виробів із високим рівнем контролю якості. На підприємстві працює понад 250 висококваліфікованих фахівців, що забезпечує безперебійну роботу всіх цехів, оперативну реалізацію замовлень та дотримання стандартів якості на кожному етапі виробництва.

Асортимент продукції компанії включає металопластикові вікна та двері, алюмінієві системи, підвіконня, ролети та супутні вироби. Підприємство пропонує як стандартні конструкції, так і індивідуальні рішення за специфікацією клієнта. Однією з особливостей виробництва є власна профільна система «ViGrand 7», яка має сім камер, монтажну ширину 85 мм і товщину склопакету до 54 мм [25]. Це дозволяє забезпечувати високі показники тепло- і звукоізоляції та відповідати сучасним вимогам енергоефективності. Використання профілів класу «А» з товщиною зовнішніх стінок не менше 3 мм гарантує надійність і довговічність виробів.

Компанія ViGrand приділяє особливу увагу комплексному підходу до виробництва та обслуговування клієнтів. Підприємство забезпечує контроль

якості на всіх етапах виробництва: від відбору сертифікованої сировини до фінальної упаковки готової продукції. Для замовників компанія пропонує послуги з професійних замірів, індивідуального проєктування, доставки та монтажу конструкцій.

Основні переваги ViGrand полягають у власному виробництві профілів і склопакетів, високому рівні автоматизації, широкому асортименті продукції та здатності виконувати індивідуальні замовлення. Попит на металопластикові конструкції в Україні постійно зростає через необхідність заміни старих дерев'яних вікон на сучасні енергоефективні та активне житлове будівництво. Завдяки масштабним виробничим потужностям і власним профільним системам, ViGrand здатен швидко реагувати на ринкові зміни та забезпечувати високу якість продукції.

Серед основних викликів, з якими стикається підприємство, – коливання цін на сировину, необхідність модернізації обладнання, конкуренція на ринку та підвищені вимоги до енергоефективності та екологічності продукції. Проте наявність сучасних автоматизованих ліній, власних профільних систем, кваліфікованого персоналу та організованої логістики створює сприятливі умови для подальшого розвитку та зміцнення позицій компанії на ринку.

2.3 Характеристика виробничого процесу підприємства ViGrand (м. Миколаїв)

Виробничий процес на підприємстві ViGrand відзначається високим ступенем організації, технологічної продуманості та комплексним контролем якості на кожному етапі.

Процес починається з планування виробництва: визначаються обсяги замовлень, підбираються необхідні ресурси, комплектуючі та сировина, а також готуються виробничі площі та обладнання. Наступним кроком є налаштування автоматизованих ліній для конкретного замовлення.

Основою профілю є непластифікований полівінілхлорид (НПВХ), доповнений стабілізаторами, модифікаторами міцності, мастилами, діоксидом титану та іншими компонентами для забезпечення міцності, морозостійкості, стійкості до ультрафіолету та довговічності виробів. Суміші ПВХ проходять ретельний контроль перед екструзією, щоб забезпечити стабільність розмірів і фізико-механічних властивостей профілів.

Для формування профілів використовуються двошнекові екструдери, які забезпечують рівномірне плавлення та ущільнення суміші. Конструкція шнеків із щільним зачепленням і обертанням у протилежних напрямках дозволяє підтримувати необхідний тиск, оптимальну швидкість переміщення матеріалу та мінімізувати термін перебування ПВХ у циліндрі екструдера. Після виходу з екструдера профілі проходять через вакуумний калібратор, де набувають заданої форми, а подальше охолодження у водяній ванні забезпечує стабільність геометрії.

Профілі нарізаються на заготовки необхідної довжини та передаються на ділянку зварювання, фрезерування та складання. Встановлюється армування із сталі або алюмінію, монтуються склопакети, фурнітура та декоративні елементи. Дверні конструкції проходять додаткову обробку і встановлення складної фурнітури.

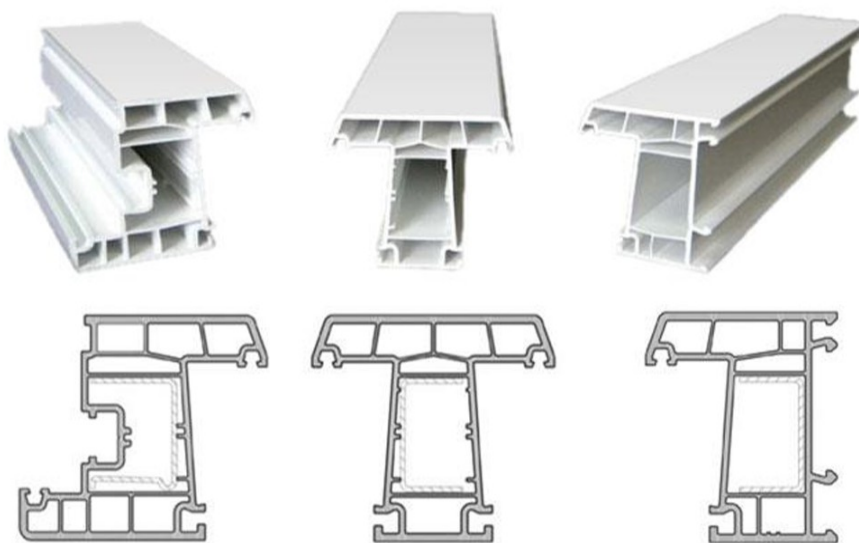


Рисунок 2.1 - Профілі металопластикового вікна

Виробництво склопакетів здійснюється на автоматизованій лінії Lisec, здатній виготовляти до 1500 одиниць за зміну, що забезпечує повний контроль якості ключового компонента конструкцій. Для обробки профілів застосовуються верстати для різки, свердління, фрезерування, електрозварювальні преси, обладнання для нанесення захисного покриття, сушильні камери, автоматизовані системи маркування та пакування.

Контроль якості на всіх етапах виробництва включає перевірку геометрії профілів, герметичності склопакетів, відповідність тепло- та звукоізоляційним характеристикам. Вироби відповідають українським ДСТУ та європейським стандартам EN 12608 SR. Висока автоматизація та комплексний контроль дозволяють оперативно виконувати замовлення, підтримувати стабільну якість продукції та зберігати конкурентоспроможність на ринку металопластикових вікон і дверей.

Завдяки сучасним виробничим потужностям, власним профільним системам і автоматизації процесів, ViGrand забезпечує високу ефективність виробництва, стабільну якість продукції та комплексний сервіс для клієнтів, що включає заміри, виготовлення, доставку та монтаж готових конструкцій.

Таблиця 2.3 – Основне обладнання та обсяги виробництва ViGrand [25].

Обладнання / лінія	Призначення	Потужність / обсяг виробництва
Двошнекові екструдери	Виготовлення ПВХ-профілів	до 8000 м профілю/місяць
Вакуумні калібратори	Формування профілів	до 1500 профілів/зміну
Лінія Lisec	Виробництво склопакетів	до 1500 конструкцій/зміну
Електрозварювальні преси	Зварювання рам та профілів	до 1200 рам/зміну
Фрезерні та різальні верстати	Обробка ПВХ та алюмінієвих профілів	безперервна обробка всіх замовлень
Лінії для нанесення захисного покриття	Підвищення довговічності конструкцій	до 2000 виробів/зміну
Сушильні камери	Сушіння склопакетів та профілів	до 1000 виробів/зміну
Автоматизовані системи маркування і пакування	Завершальний етап виробництва	до 1500 виробів/зміну

Таблиця 2.4 - Основні шкідливі речовини, які можуть потрапляти до навколишнього середовища під час виробництва металопластикових (ПВХ) вікон

№	Речовина / Викид	Джерело утворення	Потенційний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини
1	CO ₂ (вуглекислий газ)	Використання електроенергії, опалення виробничих цехів, екструзія профілів	Внесок у глобальне потепління, парниковий ефект
2	NO _x (оксиди азоту)	Спалювання енергоносіїв, технологічне обладнання	Забруднення повітря, утворення кислотного дощу, подразнення дихальних шляхів
3	SO _x (оксиди сірки)	Використання палива, енергетичні установки	Забруднення повітря, кислотний дощ, негативний вплив на рослини та водойми
4	HCl (хлористий водень, газ)	Екструзія ПВХ, термічна обробка, помилки при утилізації	Корозія металів, подразнення очей і дихальних шляхів, кислотне забруднення ґрунту
5	Леткі органічні сполуки (VOC)	Пластифікатори, мастила, стабілізатори, лаки	Забруднення повітря, фотохімічний смог, подразнення дихальних шляхів
6	Діоксид титану (TiO ₂)	Фарба і стабілізатори ПВХ	Пил у виробничих цехах може подразнювати дихальні шляхи, інертний для довкілля, накопичується у відходах
7	Фталати (пластифікатори)	Додавання до ПВХ для гнучкості	Ендокринні порушення, токсичність для водних організмів
8	Свинець (Pb) у старих стабілізаторах ПВХ	Деякі стабілізатори ПВХ	Токсичність для людей, накопичення в ґрунті та воді, отруєння
9	Крейда (CaCO ₃ , гідрофобна)	Наповнювач профілів	Пил у повітрі виробничих цехів, незначний хімічний вплив
10	Відходи обрізків ПВХ	Нарізка профілів та браку	Можуть потрапляти на сміттєзвалища, при спалюванні виділяють HCl та токсичні гази

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ReCiPe MIDPOINT TA ENDPOINT

3.1 Історія виникнення методів ReCiPe

Методи ReCiPe MidPoint та EndPoint виникли як розвиток методології оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка з'явилася у другій половині XX століття для систематичної оцінки екологічних впливів продукції, технологій та процесів. Основною метою LCA було забезпечення комплексного та порівнянного аналізу впливів на довкілля на всіх етапах життєвого циклу продукту [27-29].

У 1990-х роках міжнародна спільнота, зокрема в Європейському Союзі, активно працювала над стандартизацією методів LCA, що призвело до створення ISO 14040–14044. Проте існувала потреба в універсальному методі оцінки впливів, який поєднував би детальний аналіз проміжних категорій та інтегровану оцінку шкоди для людини та екосистем.

У 2008 році група під керівництвом Р. Huijbregts розробила метод ReCiPe, що інтегрував підходи CML (Centre of Environmental Science, Leiden) та Eco-indicator 99. Метод ReCiPe включає два рівні оцінки:

- MidPoint – оцінка впливу на конкретні екологічні категорії (проміжний рівень),
- EndPoint – оцінка кінцевої шкоди для здоров'я людини, стану екосистем та використання ресурсів.

ReCiPe став міжнародним стандартом у LCA, широко використовується у промислових, урбаністичних та політичних дослідженнях, забезпечуючи науково обґрунтовану підтримку рішень щодо сталого розвитку [27-30].

3.2 Метод ReCiPe MidPoint

Метод MidPoint дозволяє детально оцінити впливи на конкретні екологічні проблеми, не агрегуючи їх у загальний показник шкоди. Основна логіка побудована на лінійному ланцюгу впливу (cause-effect chain), де кожна емісія або споживання ресурсу конвертується у потенційний вплив на певну категорію[26-28].

Основні категорії оцінки впливу включають:

- Глобальне потепління (GWP) – $kg\ CO_2$ -еквівалент
- Озоноруйнівний ефект (ODP) – $kg\ CFC-11$ -еквівалент
- Фотохімічний смог (POCP) – $kg\ C_2H_4$ -еквівалент
- Закислення (AP) – $kg\ SO_2$ -еквівалент
- Евтрофікація (EP) – $kg\ PO_4^{3-}$ -еквівалент
- Токсичність для людини (HTP) – $kg\ 1,4-DCB$ -еквівалент
- Токсичність для екосистем (ETP) – $kg\ 1,4-DCB$ -еквівалент
- Використання ресурсів (RD) – $kg\ Sb$ -еквівалент

Потенційний вплив категорії i обчислюється за формулою:

$$IC_i = \sum_{j=1}^n E_j \cdot CF_{ij}$$

де:

- IC_i – індикатор категорії впливу,
- E_j – кількість емісії речовини j у середовище,
- CF_{ij} – Characterization Factor (потенційний вплив речовини j на категорію i),
- n – кількість речовин, що впливають на категорію i .

Етапи оцінки показників MidPoint

1. Збір даних (E_j):

- Вимірювання або оцінка кількості викидів у повітря, воду та ґрунт, а також споживання ресурсів.
- Джерела: Ecoinvent, GaBi, ELCD, EPA, ЕМЕР/ЕЕА, власні експериментальні дані.

2. Вибір категорій впливу:

- Визначаються релевантні для продукту категорії MidPoint.
- Джерела: ReCiPe 2016 MidPoint, CML 2001.

3. Застосування CF_{ij} :

- Множення E_j на Characterization Factors, які отримані з ReCiPe 2016 або інших баз даних.

4. Сумування внесків:

- Розрахунок IC_i для кожної категорії.

5. Інтерпретація результатів:

- Виявлення “гарячих точок” виробництва та процесів з найбільшим внеском у екологічний вплив.

3.3 Метод ReCiPe EndPoint

Метод EndPoint дозволяє інтегрувати результати MidPoint у загальні показники шкоди для ключових об'єктів [26-28].

- Здоров'я людини (HH) – DALY
- Стан екосистем (ES) – $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$
- Використання ресурсів (RU) – MJ

Індикатор шкоди для об'єкта k визначається за формулою:

$$HD_k = \sum_{i=1}^m IC_i \cdot SF_{ik}$$

де:

- HD_k – інтегрована шкода для об'єкта k ,
- IC_i – індикатор категорії MidPoint,
- SF_{ik} – Damage Factor для конвертації MidPoint $\rightarrow$ EndPoint,
- m – кількість категорій MidPoint.

Етапи оцінки показників EndPoint

1. Провести оцінку MidPoint: отримати IC_i для всіх категорій.
2. Вибір об'єктів шкоди: людина, екосистема, ресурси.
3. Застосування SF_{ik} : використати фактори шкоди для кожного об'єкта (отримані з ReCiPe 2016 або LCA-програм SimaPro/OpenLCA).
4. Сумування внесків: обчислення HD_k для кожного об'єкта.
5. Інтерпретація: оцінка загальної шкоди, підтримка стратегічного та політичного планування.

3.4 Джерела даних для оцінки показників ReCiPe EndPoint

Для проведення оцінки за методикою ReCiPe 2016 EndPoint використовуються офіційні наукові та програмні джерела, які забезпечують достовірність факторів шкоди (SF_{ik}) і проміжних результатів (IC_i) [29-30].

ReCiPe 2016 EndPoint factors — це основна база даних, що містить стандартизовані коефіцієнти шкоди для трьох об'єктів оцінки: здоров'я людини, стану екосистем і використання ресурсів. Вона є частиною офіційного пакета

методики ReCiPe 2016, розробленого консорціумом RIVM, Radboud University і PRé Sustainability, та використовується як глобальний еталон у LCA.

Huijbregts et al. (2016) — це наукова публікація, яка описує теоретичну основу ReCiPe 2016. У ній наведено алгоритми розрахунку коефіцієнтів перетворення від MidPoint до EndPoint, моделі екологічного впливу та три концептуальні підходи (Individualist, Hierarchist, Egalitarian). Це головне джерело наукової верифікації методики.

SimaPro — спеціалізоване програмне забезпечення для LCA, яке містить інтегровані бази ReCiPe, Ecoinvent і CML. Програма автоматизує розрахунок CF_{ij} та SF_{ik} і забезпечує точне перетворення проміжних результатів у кінцеві показники.

OpenLCA — відкрите програмне середовище для проведення LCA-оцінок, що підтримує бази ReCiPe, Ecoinvent та інші. Воно забезпечує прозорість розрахунків і є академічно визнаною платформою для перевірки результатів.

IC_i — це проміжні показники, отримані на етапі ReCiPe MidPoint. Вони відображають впливи за окремими категоріями (наприклад, глобальне потепління, евтрофікація) та слугують вхідними даними для розрахунку кінцевих показників EndPoint.

Зазначені джерела утворюють взаємопов'язану систему: теоретична модель Huijbregts et al. (2016) визначає принципи розрахунку, ReCiPe 2016 надає числові коефіцієнти, а програмні платформи SimaPro та OpenLCA забезпечують практичну реалізацію оцінки. Разом вони формують науково обґрунтовану методичну основу для достовірного визначення екологічної шкоди на рівні EndPoint.

Таблиця 3.1. Покроковий план оцінки показників ReCiPe MidPoint та EndPoint [26, 29]

Крок	Мета	Дії	Формула / показник	Джерела даних
1	Визначення меж LCA та об'єкта дослідження	Визначити етапи життєвого циклу: видобуток, виробництво, транспортування, використання, утилізація	–	ISO 14040–14044, наукові публікації
2	Збір даних про емісії та ресурси	Отримати E_j для всіх етапів	E_j	Ecoinvent, GaBi, ELCD, EPA, ЕМЕР/ЕЕА, власні дані
3	Вибір категорій MidPoint	Визначити релевантні категорії	–	ReCiPe 2016 MidPoint, CML 2001
4	Отримання Characterization Factors	Вибрати CF_{ij} для кожної речовини і категорії	CF_{ij}	ReCiPe 2016, CML, Eco-indicator 99
5	Розрахунок MidPoint	Обчислити IC_i	$IC_i = \sum (E_j \times CF_{ij})$	Вихідні дані кроків 2–4
6	Вибір об'єктів EndPoint	Визначити об'єкти шкоди	–	ReCiPe 2016 EndPoint
7	Отримання Damage Factors	Вибрати SF_{ik} для конвертації MidPoint → EndPoint	SF_{ik}	ReCiPe 2016, Huijbregts et al., 2016, SimaPro, OpenLCA
8	Розрахунок EndPoint	Обчислити HD_k	$HD_k = \sum (IC_i \times SF_{ik})$	Вихідні дані кроків 5–7
9	Інтерпретація результатів	MidPoint: гарячі точки; EndPoint: інтегрована шкода	–	–

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ І ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІКОН У ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

4.1 Загальні характеристики життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

Екологічний вплив експлуатації вікон безпосередньо залежить від їхніх теплоізоляційних параметрів, а отже — від кількості тепла, необхідного для підтримання комфортної температури в будівлі. Важливу роль у цьому відіграє тип системи опалення і, передусім, вид палива, що використовується для виробництва тепла.

В Україні, як і в інших країнах Центральної Європи, значна частка односімейних будинків досі опалюється за допомогою систем, що працюють на викопному паливі — вугіллі, дровах або природному газі. У багатоповерхових будинках переважає централізоване теплопостачання, яке також базується переважно на спалюванні природного газу чи вугілля. Така структура джерел енергії зумовлює високі викиди парникових газів і забруднювальних речовин.

Тому під час оцінювання екологічного балансу віконних конструкцій необхідно враховувати не лише вплив їхнього виробництва, а й умови експлуатації за різних варіантів опалення будівель — як у приватному, так і в багатоповерховому житловому секторі. Це дозволить отримати більш об'єктивну картину загального екологічного впливу та визначити оптимальні рішення для підвищення енергоефективності будівельного фонду.

Для оцінки життєвого циклу необхідно зауважити - наскільки виробництво вікон різної конструкції та з різними теплоізоляційними параметрами впливає на довкілля, і наскільки негативний екологічний вплив виробництва вікон із кращою теплоізоляцією компенсується зменшенням впливу, пов'язаного з економією палива (газ, вугілля, мазут), що використовується для виробництва тепла під час експлуатації вікон.

Для оцінка життєвого циклу було обрано три типи вікон:

- тришарове скління з алюмінієвою конструкцією,
- двошарове скління з ПВХ-конструкцією,
- тришарове скління з ПВХ-конструкцією.

В результаті було визначено, що в усіх категоріях впливу більші екологічні втрати, пов'язані з покращенням теплоізоляційних параметрів вікон на етапі виробництва, повністю компенсуються на етапі їх експлуатації, незалежно від типу палива, що використовується для опалення будівель. Двошарові ПВХ-вікна слід поступово виводити з виробництва через значний екологічний слід, пов'язаний з їх експлуатацією.

Аналіз питань, пов'язаних зі зміною клімату, виснаженням запасів викопного палива та енергетичною безпекою, посилює потребу у зменшенні споживання енергії та викидів CO₂ у будівельному секторі, який відповідає за значну частку глобального екологічного сліду [31]. Насправді будівлі є великими споживачами енергії [32-33], матеріалів і води, а також значними джерелами відходів і шкідливих викидів [34], включно з CO₂.

Вікна є конструктивним елементом, який впливає на функціонування будівлі, зокрема на її енергоефективність, тепловий і світловий комфорт. Вони також є основним елементом, що забезпечує контакт людини з навколишнім середовищем. Виходячи з того, що вікна мають забезпечувати вентиляцію, звукоізоляцію, стійкість до вітру та вогню, здебільшого їх обирають за показником теплоізоляції.

Типи вікон і їх характеристики суттєво впливають на екологічну та економічну ефективність будівель. Поряд із впровадженням відновлюваних джерел енергії і модернізацією інфраструктури, заміна вікон у будівлях (особливо в житлових і громадських спорудах) стала головним заходом термомодернізації, який знижує енергоємність і підвищує енергоефективність будівель. Площа вікон у конструкції будівлі становить приблизно 20% загальної

площі огорожувальних конструкцій. Сукупні тепловтрати через вікна більш ніж у 4 рази вищі, ніж у випадку утеплених стін [36].

Важливим параметром вікон є коефіцієнт теплопередачі, який залежить від типу конструкційного матеріалу. За даними Саадатіана та співавт, значення коефіцієнта теплопередачі має більший вплив для менших вікон у теплішому кліматі та для більших вікон у холоднішому кліматі [35]. Як зазначалося раніше, виробництво вікон — це процес, що створює численні загрози для природного середовища.

Життєвий цикл кожного вікна починається з видобутку сировини, що впливає на локальні екосистеми, виснажує невідновлювані ресурси, потребує енергії та генерує відходи. Після видобутку сировина транспортується до великих виробничих підприємств, де її перетворюють на стандартизовані матеріали для подальшого використання у виробництві вікон. Для вікон як елементів будівлі вплив матеріалів є більшим, оскільки це високовартісні, технологічно складніші продукти, ніж інші будівельні матеріали. Це зумовлює непропорційний екологічний вплив порівняно з їхньою масою та площею.

Метод, обраний для оцінки, — оцінка життєвого циклу (LCA, Life Cycle Assessment). Метод відповідає стандарту ISO 14000 і широко застосовується у наукових дослідженнях. LCA вікон є надзвичайно важливим інструментом для комплексної оцінки впливу виробництва та експлуатації вікон на довкілля.

Цей аналіз охоплює не лише сам процес виробництва, а й увесь життєвий цикл продукту — від отримання сировини, через виробництво, використання до утилізації, тобто підхід «від колиски до могили». Метою оцінки життєвого циклу (LCA) для вікон найчастіше є порівняння матеріалів, з яких виготовляють віконні рами, визначення екологічного впливу виробництва та розрахунок теплових заощаджень під час експлуатації вікон, особливо кількості тепла, необхідного упродовж опалювального сезону [37-38].

Слід зазначити, що вікна з вищими теплоізоляційними властивостями можуть зменшити споживання енергії, необхідної для обігріву будівлі. У

довгостроковій перспективі це знижує витрати на опалення та викиди парникових газів. Водночас виробництво вікон із покращеною ізоляцією зазвичай потребує більшої кількості енергії й супроводжується підвищеними викидами парникових газів. З іншого боку, вікна з нижчим рівнем теплоізоляції можуть вимагати менше енергії на етапі виробництва, але під час експлуатації будівлі призводять до більшого споживання енергії. Це призводить до підвищення експлуатаційних витрат і більшого негативного впливу на довкілля через процес опалення.

Екологічний вплив експлуатації вікон залежить від їхніх теплоізоляційних параметрів, а отже — від кількості тепла, яке потрібно виробити для обігріву будівлі. Також важливими є тип системи опалення і, насамперед, тип палива, що використовується для виробництва тепла.

На жаль, в Україні значна частина як приватних житлових будинків, так і багатоповерхових будинків опалюється системами, що використовують викопне паливо. У приватному секторі це здебільшого індивідуальні котли на газі, вугіллі або мазуті, а багатоповерхові будинки зазвичай підключені до централізованих теплових мереж, які також працюють на газі або мазуті. Водночас процес модернізації цих систем, зумовлений, серед іншого, необхідністю адаптації до європейських екологічних стандартів та вимог «Зеленого курсу» (Green Deal), є тривалим і потребує значних інвестицій, модернізації інфраструктури, технічних рішень та державної підтримки. Тому важливо представити екологічний баланс як виробництва, так і експлуатації вікон для різних варіантів опалення будівель.

Вибір типу вікон і їхня ефективність під час експлуатації залежать від багатьох чинників, включно з локальними умовами, такими як кліматичні особливості, орієнтація будівлі щодо сторін світу, найближче оточення тощо. Різниця температур всередині й зовні будівлі або різна інтенсивність сонячного випромінювання в певній кліматичній зоні повністю змінюють кількість теплового обміну через вікна.

4.2 Характеристика об'єктів оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

Об'єктом дослідження є три типи вікон:

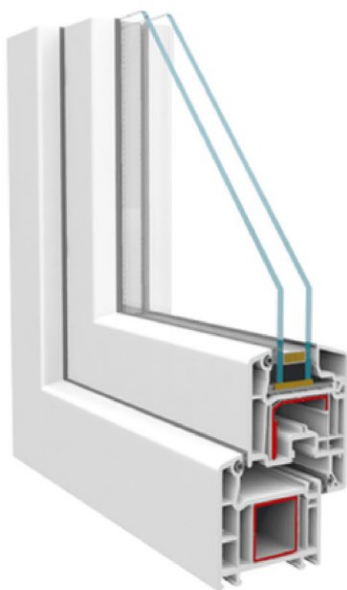
- тришарове алюмінієве вікно;
- двошарове (однокамерне) ПВХ-вікно;
- тришарове (двокамерне) ПВХ-вікно.

На рисунках 1 і 2 показано структуру досліджуваних вікон.



Рисунок 4.1 - Поперечний переріз алюмінієвого вікна розміром 1000 × 1000 мм зі склопакетом 4/18/4/18/4.

a)



b)



Рисунок 4.2 - Поперечний переріз ПВХ-вікна розміром 1000×1000 мм: (a) зі склопакетом 4/14/4, (b) зі склопакетом 4/14/4/14/4.

Алюмінієве вікно, поперечний переріз якого наведено на рис. 4.1, має найнижчий коефіцієнт теплопередачі — $U_w = 0.82 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Воно виготовлене з алюмінієвих профілів із трьома ізоляційними камерами та ущільнювачами, має додаткові термоізоляційні вставки, а також теплоізоляційну піну у стулці та коробці.

Склопакет складається з трьох скелець завтовшки 4 мм, розділених алюмінієвою рамкою шириною 18 мм, що утворюють дві камери, заповнені аргоном.

ПВХ-вікно з однокамерним (двошаровим) склопакетом, поперечний переріз якого показано на рис. 4.2а, має найвищий коефіцієнт теплопередачі — $U_w = 1.10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

Конструкція вікна складається з ПВХ-профілів із п'ятьма ізоляційними камерами, ущільнювачами та сталевими підсиленнями. Склопакет складається з двох скелець завтовшки 4 мм, розділених алюмінієвою рамкою шириною 14 мм, що утворюють одну камеру, заповнену аргоном.

Останній тип — ПВХ-вікно з двокамерним (тришаровим) склопакетом, поперечний переріз якого наведено на рис. 4.2b. Це вікно має коефіцієнт теплопередачі $U_w = 0.92 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ і виготовлене з ПВХ-профілів із п'ятьма ізоляційними камерами, ущільнювачами та сталевими підсиленнями.

Склопакет складається з трьох скелець завтовшки 4 мм, розділених алюмінієвими рамками шириною 14 мм, що утворюють дві камери, заповнені аргоном.

У таблиці 1 наведено порівняння найважливіших параметрів досліджуваних вікон.

Таблиця 4.1 - Загальні характеристики вікон.

Тип вікна	Коефіцієнт теплопередачі U_w ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$)	Кількість ізолюючих камер	Термін служби (років)
Трипакетне алюмінієве вікно	0,82	3	50
Двопакетне ПВХ-вікно	1,10	5	25
Трипакетне ПВХ-вікно	0,92	5	25

У дослідженні використано підхід «від колиски до могили» (cradle-to-gate). На рис. 4.3 показано межі системи для виробництва трьох досліджуваних типів вікон.

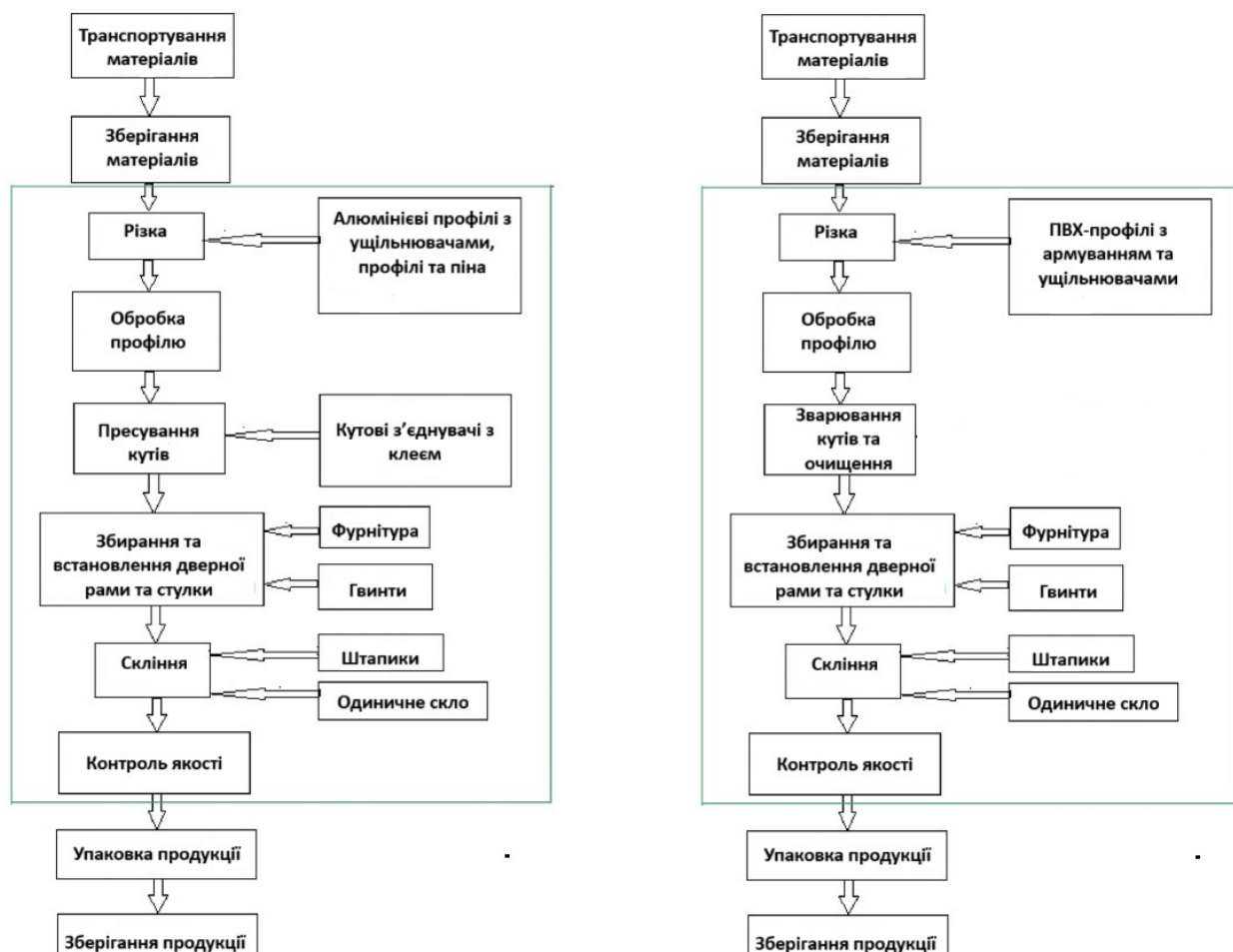


Рисунок 4.3 - Межі виробничої системи для вікон: (а) алюмінієві, (б) ПВХ.

Обидва процеси виробництва охоплюють основні операції — від різання профілів до контролю якості. Попередні та подальші етапи, такі як постачання матеріалів для виробництва, а також пакування, зберігання, зовнішнє транспортування та продаж, до розрахунків не включалися.

Причина полягає в тому, що ці етапи виконуються по-різному, що унеможлиблює їх кількісну оцінку за методологією LCA. Процес пакування вікон залежить від вимог замовника, відстані доставки та кількості замовлених вікон — іноді вікна взагалі не пакують.

Аналогічно, зберігання може тривати різний час або взагалі не відбуватися. Через це пакування і зберігання, враховуючи їхню незначну частку у впливі, не мають суттєвого екологічного ефекту на загальний процес виробництва.

Щодо транспортування матеріалів, воно здійснюється зовнішніми компаніями, які співпрацюють із виробником вікон. Перевезення зазвичай комбінуються: одні й ті самі транспортні засоби доставляють матеріали як для виробництва вікон, що включені в аналіз, так і для виготовлення дверей та інших виробів. Це також ускладнює проведення точного аналізу LCA.

4.3 Етапи оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

Методичні засади оцінки життєвого циклу регулюються серією стандартів ISO 14000 (від 14040 до 14049). Ці стандарти визначають вимоги, правила проведення аналізу LCA, а також правила інтерпретації отриманих результатів.

Згідно зі стандартом ISO 14040, LCA визначається як метод оцінки впливу вхідних елементів виробництва на природне середовище.

Відповідно до ISO 14040, методологія LCA включає чотири основні етапи:

1. Визначення мети та обсягу дослідження;
2. Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу (LCI);
3. Оцінку впливу життєвого циклу (LCIA);
4. Інтерпретацію результатів життєвого циклу.

Для визначення екологічних взаємозалежностей усіх вхідних та вихідних елементів, що охоплюються дослідженням, і для оцінки їхнього впливу на довкілля було використано програмне забезпечення SimaPro версії 8.1.0.60, яке, за даними Бахраміана, застосовується приблизно у 40% LCA-досліджень у будівельному секторі [39].

Функціональною одиницею прийнято площу 1 м² віконної поверхні, як і в дослідженнях Інтіні та співавт.

Для оцінки впливу на довкілля використано методи:

- ReCiPe MidPoint,
- ReCiPe EndPoint.

Метод ReCiPe EndPoint оцінює вплив на довкілля на трьох рівнях агрегації:

1. Вплив на здоров'я людини;
2. Вплив на біорізноманіття та екосистеми;
3. Дефіцит ресурсів.

Показники для категорій впливу в методах MidPoint і EndPoint наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Категорій впливу в методах MidPoint і EndPoint

Impact categories / Категорії впливу	Abbreviation / Скорочення	Impact categories / Категорії впливу	Abbreviation / Скорочення
Human health / Здоров'я людини	HH	Climate change / Зміна клімату	CC
Climate change human health / Зміна клімату (вплив на здоров'я людини)	CCHH	Ozone depletion / Руйнування озонного шару	OD
Ozone depletion / Руйнування озонного шару	OD	Terrestrial acidification / Кислотне забруднення ґрунтів	TA
Human toxicity / Токсичний вплив на людину	HT	Freshwater eutrophication / Евтрофікація прісної води	FE
Photochemical oxidant formation / Фотохімічне утворення оксидантів	POF	Marine eutrophication / Евтрофікація морських вод	ME
Particulate matter formation / Утворення твердих частинок (пилу)	PMF	Human toxicity / Токсичний вплив на людину	HT
Ionizing radiation / Іонізуюче випромінювання	IR	Photochemical oxidant formation / Фотохімічне утворення оксидантів	POF
Ecosystems / Екосистеми		Particulate matter formation / Утворення твердих	PMF

Impact categories / Категорії впливу	Abbreviation / Скорочення	Impact categories / Категорії впливу	Abbreviation / Скорочення
		частинок (пилу)	
Climate change ecosystems / Зміна клімату (вплив на екосистеми)	CCE	Terrestrial ecotoxicity / Токсичний вплив на наземні екосистеми	TET
Terrestrial acidification / Кислотне забруднення ґрунтів	TA	Freshwater ecotoxicity / Токсичний вплив на прісноводні екосистеми	FET
Freshwater eutrophication / Евтрофікація прісної води	FE	Marine ecotoxicity / Токсичний вплив на морські екосистеми	MET
Terrestrial ecotoxicity / Токсичний вплив на наземні екосистеми	TET	Ionizing radiation / Іонізуюче випромінювання	IR
Freshwater ecotoxicity / Токсичний вплив на прісноводні екосистеми	FET	Agricultural land occupation / Використання сільськогосподарських земель	ALO
Marine ecotoxicity / Токсичний вплив на морські екосистеми	MET	Urban land occupation / Використання міських земель	ULO
Agricultural land occupation / Використання сільськогосподарських земель	ALO	Natural land transformation / Перетворення природних земель	NLT
Urban land occupation / Використання міських земель	ULO	Water depletion / Виснаження водних ресурсів	WD
Natural land transformation / Перетворення природних земель	NLT	Mineral resource depletion / Виснаження мінеральних ресурсів	MRD
Resources / Ресурси		Fossil fuel depletion / Виснаження викопного палива	FD
Metal depletion / Виснаження металів	MD		
Fossil depletion / Виснаження викопного палива	FD		

MidPoint-показники є проміжними мірами екологічного впливу, що відображають зміни у природному середовищі, спричинені викидами або використанням ресурсів. Наприклад, викиди парникових газів можуть бути

виражені у CO₂-еквівалентах, які показують потенціал глобального потепління різних газів. Такі показники легше обчислювати та інтерпретувати, оскільки вони ближчі до джерела впливу й менш залежні від припущень. Однак MidPoint-показники не враховують повністю наслідки екологічних змін для людського добробуту чи екосистемних послуг, і не відображають відносну важливість або масштабність різних категорій впливу.

EndPoint-показники у методі ReCiPe характеризуються так:

- Здоров'я людини — виражається як кількість втрачених років життя або років життя з інвалідністю; ці величини об'єднуються в показник DALY (Disability Adjusted Life Years), одиниця виміру — роки.
- Екосистеми — виражаються як втрата видів на певній території за певний період часу (одиниця — роки).
- Дефіцит ресурсів — виражається як додаткові витрати на видобуток ресурсів у майбутньому протягом нескінченного періоду з урахуванням ставки дисконту 3%. Одиниця виміру — **долари США (USD)** [40].

EndPoint-показники є більш узагальненими та комплексними, адже вони демонструють кінцеві наслідки екологічних змін і дозволяють порівнювати різні категорії впливу на узгодженому рівні. Основна перевага методу ReCiPe полягає в тому, що він перетворює довгі списки даних LCI на обмежену кількість інтегрованих індикаторів, які відображають відносну значущість впливу. ReCiPe є унікальним, оскільки забезпечує одночасно підходи MidPoint і EndPoint, що робить його універсальнішим порівняно з методами, які використовують лише один із цих підходів. MidPoint дозволяє отримати детальні дані та статистику, тоді як EndPoint — надає результати, зручніші для інтерпретації та практичного використання.

Інвентаризація життєвого циклу (LCI)

Інвентаризація життєвого циклу (LCI) дозволяє визначити ресурси, використані у виробництві, та викиди, що виникають у цьому процесі. Це

необхідно для проведення LCA, тобто для оцінки потенційного впливу продукту на здоров'я людини та його екологічного сліду [41].

У таблицях 3 і 4 наведено окремі компоненти досліджуваних вікон, тип матеріалу та їхню масу.

Таблиця 4.3 - Вага матеріалів алюмінієвого вікна розміром 1000 × 1000 мм.

Елемент	Тип матеріалу	Вага (кг)
Склопакет	Скло	22.52
Рама стулки, коробка, штапики, аксесуари, дистанційні елементи	Алюмінієвий сплав	9.97
Теплові прокладки, центральний профіль	Штучний інтегрований ABS-полімер	2.26
Фурнітура	Оцинкована сталь	2.02
Теплові вставки	Пінополіуретан	0.60
Ущільнювачі	Термоеластомер (TPE)	0.40
Армування, аксесуари	ПВХ	0.39
Гвинти	Нержавіюча сталь	0.20

Таблиця 4.4 - Вага матеріалів ПВХ-вікна розміром 1000 × 1000 мм.

Елемент	Тип матеріалу	Вага (кг) – двокамерне вікно	Вага (кг) – трикамерне вікно
Склопакет	Скло	13.07	19.61
Рама, стулка, штапики, аксесуари	ПВХ	12.44	12.44
Армування, фурнітура	Оцинкована сталь	7.98	7.98
Ущільнювачі	Термоеластомер (TPE)	0.40	0.40
Дистанційна рамка	Алюмінієвий сплав	0.33	0.66
Гвинти	Нержавіюча сталь	0.20	0.20

Технологія виробництва алюмінієвих вікон

Виробництво алюмінієвих вікон починається з різання алюмінієвих профілів до потрібних розмірів за допомогою механічних пил. Потім профілі обробляються на фрезерних верстатах. Кути профілів з'єднуються кутовими

з'єднувачами, які заповнюються спеціальним клеєм і стискаються пневматичним пресом.

Рама та стулка, виготовлені окремо, встановлюються на спеціальні підставки для висихання клею. Далі відбувається етап монтажу фурнітури, тобто встановлення ручок, петель, ущільнювачів і засувів, а також вставлення скла. Після цього вікно проходить контроль якості.

Технологія виробництва ПВХ-вікон (двошарових і тришарових)

Технологічний процес виготовлення двошарових і тришарових ПВХ-вікон є ідентичним — відмінність полягає лише у використанні різних склопакетів та штапиків.

Профілі ПВХ ріжуться механічними пилами, потім фрезеруються, зварюються та очищуються. Після цього збираються стулки та рами, встановлюються склопакети, штапики, ручки, петлі, ущільнювачі та засуви. Завершальний етап — контроль якості.

Екологічні переваги від використання досліджуваних вікон

Тепло, що передається через огорожувальні конструкції будівель, зокрема вікна, визначається коефіцієнтом теплопередачі (U_w , Вт·м⁻²·К⁻¹). Чим нижче значення U_w , тим більший опір теплопередачі і, відповідно, краща теплоізоляція. Загальний коефіцієнт U_w для вікна визначається сукупним ефектом скла, рами, ущільнювачів та дистанційної рамки між склопакетами. Саме цей параметр є основою для оцінки екологічних вигід від використання вікон із різними теплоізоляційними властивостями.

Для розрахунку екологічного впливу використання досліджуваних вікон було взято стандартний житловий будинок, розташований у четвертому кліматичному поясі України, де середньорічна температура становить 11 °С.

Основні параметри будівлі:

- площа — 169 м²,

- об'єм — 579 м³,
- площа засклення — 41 м².

Зовнішні стіни утеплені 10-сантиметровим шаром пінополістиролу, а дах із нахилом 40° має 10 см мінеральної вати. Внутрішня температура — 22 °С. Будівля не має горища чи гаража; вентиляція природна, система охолодження відсутня.

Максимальні допустимі коефіцієнти теплопередачі для зовнішніх огорожувальних конструкцій згідно з нормативами⁵⁴:

- стіни — 0,25 Вт·м⁻²·К⁻¹,
- дах — 0,20 Вт·м⁻²·К⁻¹,
- підлога над неопалюваним підвалом — 0,25 Вт·м⁻²·К⁻¹.

За даними Шуля, середнє річне споживання тепла для опалення будинків у цьому кліматичному поясі становить приблизно 120 кВт·год·м⁻²·рік⁻¹ [42]. Значення коефіцієнта теплопередачі через вікна (U_w) залежало від типу вікна.

Для розрахунку потреби в теплі при використанні вікон із різними значеннями U_w (варіант 0 — алюмінієве тришарове, варіант 1 — ПВХ двошарове, варіант 2 — ПВХ тришарове) застосовувалось програмне забезпечення Audytor OZC 7.0. Коефіцієнт сонячної пропускну́ї здатності скла прийнято 0,5.

Теплова потреба була віднесена до функціональної одиниці — 1 м² віконної поверхні, щоб виявити різницю у впливі між моделлю з найкращими теплоізоляційними параметрами (алюмінієве вікно) та іншими варіантами (вікна з ПВХ-рамою).

Різницю у теплових потребах також було перераховано у скорочення споживання енергоресурсів за період експлуатації вікон — 25 років, що відповідає мінімальному строку служби ПВХ-вікон. Для алюмінієвих вікон прийнято термін служби 50 років, відповідно до заяв виробника.

В аналізі враховувалися найпоширеніші енергоносії, які використовуються в польських домогосподарствах:

(а) кам'яне вугілля — теплота згоряння $28,9 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, густина $800 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ККД системи 70%; (b) природний газ — теплота згоряння $35,5 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, густина $0,78 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ККД 90%; (с) паливна олива — теплота згоряння $42,6 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, густина $860 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ККД 90%.

4.4 Аналіз результатів оцінки життєвого циклу виробництва та використання вікон у житлових будівлях

Результати подано як порівняння екологічного навантаження між моделлю вікна з найкращими теплоізоляційними властивостями (алюмінієва рама) та іншими моделями (ПВХ-вікна), у різних категоріях впливу на довкілля. Ці різниці обумовлені видобутком традиційних енергоносіїв та виробництвом тепла з них.

Результати характеристики за методами ReCiPe MidPoint і EndPoint

У таблиці 5 наведено результати аналізу екологічного впливу, виконаного за методом ReCiPe MidPoint. Функціональною одиницею було прийнято 1 м^2 вікна. Аналіз охоплював 18 екологічних показників, позначення яких наведено у таблиці 2.

Узагальнюючи, виробництво алюмінієвих вікон із найкращими теплоізоляційними властивостями ($U_w = 0.82 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$) супроводжується найбільшим негативним впливом на довкілля, що підтверджується значеннями показників MidPoint у всіх категоріях впливу.

Для більшості показників вплив алюмінієвої моделі є в 1,3–3,0 рази більшим, ніж у двошарового ПВХ-вікна ($U_w = 1.10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$). Найбільші відмінності — у категоріях прісноводна (FET) і морська екотоксичність (MET), де показники для алюмінієвого вікна приблизно у 19 разів вищі, що зумовлено використанням алюмінію.

Таблиця 4.5 - Результати проміжного аналізу ReCiPe для виробництва трьох досліджуваних моделей вікон.

Категорія впливу	Одиниця	Трикамерне алюмінієве вікно	Двокамерне ПВХ-вікно	Трикамерне ПВХ-вікно
CC	кг CO ₂ -екв	111.61	63.20	73.13
OD	кг CFC-11-екв	0.000009	0.000003	0.000004
TA	кг SO ₂ -екв	0.7619	0.3081	0.3909
FE	кг P-екв	0.0321	0.0128	0.0147
ME	кг N-екв	0.0256	0.0135	0.0162
HT	кг 1,4 DB-екв	37.98	14.03	16.66
POF	кг NMVOC	0.4672	0.3159	0.3644
PMF	кг PM10-екв	0.3064	0.1461	0.1736
TET	кг 1,4-DB-екв	0.0068	0.0038	0.0045
FET	кг 1,4-DB-екв	25.25	1.30	2.18
MET	кг 1,4-DB-екв	21.76	1.17	1.93
IR	кБк U235-екв	5.49	2.21	2.84
ALO	м ² рік	2.97	1.31	1.74
ULO	м ² рік	1.127	0.569	0.684
NLT	м ²	0.0148	0.0067	0.0087
WD	м ³	1.17	2.67	2.75
MD	кг Fe-екв	25.06	17.43	19.52
FD	кг нафт. екв	30.59	23.49	26.07

Єдиним винятком є показник виснаження водних ресурсів (WD) — його значення для ПВХ-вікон більш ніж удвічі вище, ніж для алюмінієвих, через більшу масу ПВХ-матеріалу у конструкції.

Порівняння двошарового та тришарового ПВХ-вікна визначено різницю у межах 10–30%, що свідчить про дещо більший вплив тришарових вікон. Для показників FET і MET різниця сягає приблизно 70%, через більшу кількість алюмінієвих елементів у тришаровому вікні.

Один із найважливіших показників — зміна клімату (викиди CO₂) — виявлено майже дворазову різницю між двошаровим ПВХ-вікном і алюмінієвим. Це пояснюється тим, що вікна істотно впливають на загальні викиди CO₂ будівлі: за даними Radhi & Sharples, кожен м² застосування може збільшити загальні викиди CO₂ на 30% у порівнянні з непрозорими стінами. Слід зазначити, що результати LCA важко порівнювати через відсутність міжнародної уніфікації методик, тому їх застосування у будівництві залишається складним [43].

У таблиці 4.6 подано результати аналізу впливу за методом ReCiPe EndPoint, який охоплює 17 показників (див. Таблицю 4.2).

Таблиця 4.6 Результати кінцевого аналізу ReCiPe для виробництва трьох досліджуваних типів вікон.

Категорія впливу / Impact category	Скорочення / Abbreviation	Одиниця	Трикамерне алюмінієве вікно	Двокамерне ПВХ-вікно	Трикамерне ПВХ-вікно
Здоров'я людини / Human health	H	DALY	0.000263	0.000136	0.000159
Зміна клімату (вплив на здоров'я людини) / Climate change human health	CCHH	DALY	0.0001562529	0.0000884883	0.0001023908
Руйнування озонового шару / Ozone depletion	OD	DALY	0.0000000163	0.0000000084	0.0000000105
Токсичний вплив на людину / Human toxicity	HT	DALY	0.0000265795	0.0000098215	0.0000116626
Фотохімічне утворення оксидантів / Photochemical oxidant formation	POF	DALY	0.0000000182	0.0000000123	0.0000000142
Утворення твердих частинок (пили) / Particulate matter formation	PMF	DALY	0.0000796876	0.0000380058	0.0000451445
Іонізуюче випромінювання / Ionizing radiation	IR	DALY	0.0000000901	0.0000000364	0.0000000467
Екосистеми / Ecosystems	E	species·yr	0.000001002	0.000000544	0.000000636
Зміна клімату (вплив на екосистеми) / Climate change ecosystems	CCE	species·yr	0.0000008850	0.0000005012	0.0000005799
Кислотне забруднення ґрунтів / Terrestrial acidification	TA	species·yr	0.0000000044	0.0000000018	0.0000000023
Евтрофікація прісної води / Freshwater eutrophication	FE	species·yr	0.0000000014	0.0000000006	0.0000000007

Категорія впливу / Impact category	Скорочення / Abbreviation	Одиниця	Трикамерне алюмінієве вікно	Двокамерне ПВХ-вікно	Трикамерне ПВХ-вікно
Токсичний вплив на наземні екосистеми / Terrestrial ecotoxicity	TET	species·yr	0.0000000010	0.0000000006	0.0000000007
Токсичний вплив на прісноводні екосистеми / Freshwater ecotoxicity	FET	species·yr	0.0000000216	0.0000000011	0.0000000019
Токсичний вплив на морські екосистеми / Marine ecotoxicity	MET	species·yr	0.0000000038	0.0000000002	0.0000000003
Використання сільськогосподарських земель / Agricultural land occupation	ALO	species·yr	0.0000000357	0.0000000158	0.0000000209
Використання міських земель / Urban land occupation	ULO	species·yr	0.0000000233	0.0000000118	0.0000000142
Перетворення природних земель / Natural land transformation	NLT	species·yr	0.0000000257	0.0000000114	0.0000000147
Ресурси / Resources	R	\$	6.85	5.13	5.71
Виснаження металів / Metal depletion	MD	\$	1.79	1.25	1.40
Виснаження викопного палива / Fossil depletion	FD	\$	5.06	3.88	4.31

Одиниця **species·yr** («вид·рік») використовується для оцінки впливу на біорізноманіття в методах LCA, зокрема ReCiPe. Вона показує сумарний час існування видів, який втрачається через екологічний вплив певного продукту або процесу. Наприклад, значення 0,01 species·yr означає, що різні види у сумі втратили один рік свого існування через діяльність, пов'язану з виробництвом або експлуатацією продукту.

У категорії «Здоров'я людини» видно, що виробництво алюмінієвих вікон (із найкращими теплоізоляційними властивостями) має майже вдвічі більший негативний вплив, ніж виробництво двошарового ПВХ-вікна (з найвищим U_w). Однак, як зазначають Citherlet et al., навіть якщо такі вікна мають дещо більший вплив на довкілля протягом життєвого циклу, енергетичні вигоди під час експлуатації часто переважають цей ефект [44].

Для двошарових і тришарових ПВХ-вікон різниця у категорії «Здоров'я людини» становить близько 20%. Подібна тенденція спостерігається у категорії «Екосистеми», хоча різниця між алюмінієвими та двошаровими ПВХ-вікнами трохи менша. У категорії «Ресурси» відмінності ще нижчі: виробництво алюмінієвого вікна має приблизно на 30% більший вплив на виснаження

природних ресурсів порівняно з двошаровим ПВХ-вікном, тоді як між двома типами ПВХ різниця лише 10%.

Високий екологічний слід алюмінієвих вікон пояснюється високими енерговитратами на виробництво, про що зазначають Cabeza et al.. Asif et al. довели, що виготовлення алюмінієвої рами розміром $1,2 \times 1,2$ м потребує 6 ГДж енергії, тоді як для ПВХ-вікна — лише 2,9 ГДж.

Результати оцінки впливу життєвого циклу (LCIA)

Оцінка впливу — це третій етап LCA, проведений згідно з ISO 14044. На рис. 4.4 показано зважений екологічний вплив (EI) для виробництва трьох типів вікон.

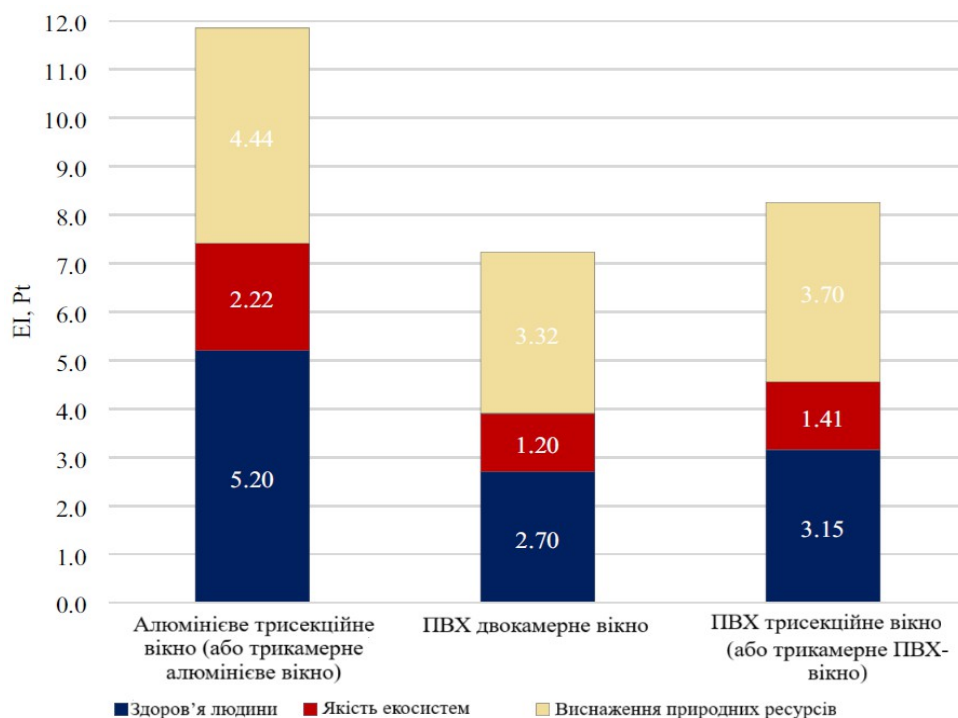


Рисунок 4.4 - Вплив на довкілля (EI) під час виробництва вікон у трьох категоріях шкідливого впливу.

Результати свідчать, що найнижчий екологічний вплив ($EI = 7.22$ Pt) характерний для двошарового ПВХ-вікна, яке має гірші теплоізоляційні властивості.

Покращення ізоляції за рахунок збільшення кількості склопакетів до трьох

підвищує екологічне навантаження на виробництво на ~14% ($EI = 8.26 \text{ Pt}$).

Як зазначають Horup et al., енергетичні вигоди під час експлуатації можуть бути знівельовані більшим впливом під час виробництва [43-44].

Перевага ПВХ як матеріалу для рам полягає у можливості модифікації, механічній міцності, хімічній стійкості та низьких енерговитратах на виробництво.

Хоча алюмінієві вікна мають кращі теплоізоляційні параметри, вони потребують інших матеріалів та технологій, що призводить до значного негативного екологічного ефекту: $EI = 11.86 \text{ Pt}$, що на 64% більше, ніж для двошарового ПВХ, і на 43% більше, ніж для тришарового.

При цьому 44% загального впливу алюмінієвих вікон припадає на виснаження ресурсів, тоді як у ПВХ-вікон домінує категорія «Здоров'я людини» (приблизно 45–46% EI). Найменший вплив усіх трьох типів вікон спостерігається у категорії «Екосистеми», де значних відмінностей не виявлено (значення EI становлять 17–19% від загального екологічного впливу).

У таблиці 4.7 узагальнено результати розрахунків зміни теплового навантаження внаслідок використання проаналізованих типів вікон на 1 м^2 віконної поверхні відносно варіанта 0 (алюмінієве вікно з найкращими теплоізоляційними параметрами). Також подано зменшення потреби в різних видах палива. Їх характеристики наведено в розділі «Результати характеристики за методом ReCiPe midpoint та endpoint» (для 1 року експлуатації та всього 25-річного періоду служби).

Таблиця 4.7 - Зміна потреби в теплі та енергоносіях залежно від типу використаних вікон

Тип вікна	Двокамерне ПВХ-вікно	Трикамерне ПВХ-вікно
Зміна потреби у теплі для будівлі (кВт·год/рік) відносно варіанту 0	796.1	284.2
Зміна потреби у теплі на 1 м ² вікон (кВт·год/рік) відносно варіанту 0	19.4	6.9
Потреба у кам'яному вугіллі (кг/рік) відносно варіанту 0	4.16	1.48
Потреба у природному газі (м ³ /рік) відносно варіанту 0	1.70	0.60
Потреба у мазуті для опалення (кг/рік) відносно варіанту 0	1.81	0.64

У будівлі теплове навантаження становило 19 075,2 кВт·год/рік. Серед усіх типів вікон найменшу потребу в теплі (табл. 4.7) забезпечують вікна варіанту 0 (потрійне скло, алюмінієва рама). Їхній коефіцієнт теплопередачі найнижчий, отже, вони є найкращим ізолятором. На 1 м² площі такі вікна дозволяють щорічно заощадити 19,4 кВт·год тепла порівняно з двокамерними вікнами з ПВХ-рами та 6,9 кВт·год у порівнянні з потрійними ПВХ-вікнами. Такі теплові заощадження зменшують потребу в енергоносіях, необхідних для обігріву будинку.

Найгірші результати мають двокамерні ПВХ-вікна — у цьому випадку споживання тепла в будинку за 25 років експлуатації буде вищим і потребуватиме на 104 кг вугілля, 42,5 м³ газу або 45,2 кг мазуту більше, ніж при використанні алюмінієвих вікон. Для потрійних ПВХ-вікон ці різниці становлять 37 кг вугілля, 15 м³ газу та 16 кг мазуту.

Згідно з Zhou et al., вікна можуть бути причиною до 30% тепловтрат взимку, а за Gramlick — навіть до 40%, тому такі відмінності мають велике значення для загального енергетичного балансу будівлі [44-45].

Одним із завдань аналізу було з'ясувати, чи може більший вуглецевий слід виробництва алюмінієвих вікон (у порівнянні з ПВХ) бути компенсований

меншими втратами тепла протягом експлуатації будинку. Згідно з Buyle і Braet , у стандартних будівлях до 90% загального екологічного впливу припадає саме на фазу експлуатації (переважно опалення) [46].

У таблиці 4.8 подано результати порівняння впливу на довкілля (через зменшення споживання енергоносіїв для опалення) алюмінієвих і ПВХ-вікон за 25-річний строк служби (за моделлю Midpoint ReCiPe). Позитивні значення в усіх категоріях означають, що експлуатація вікон із ПВХ має гірший екологічний вплив, ніж вікон із алюмінієвою рамою.

Таблиця 4.8 - Порівняння впливу на довкілля алюмінієвих і ПВХ-вікон з точки зору зменшення потреби в теплі; аналіз ReCiPe—MidPoint.

Категорія впливу / Impact category	Одиниця	Вугілля / Двокамерне ПВХ-вікно	Вугілля / Трикамерне ПВХ-вікно	Природний газ / Двокамерне ПВХ-вікно	Природний газ / Трикамерне ПВХ-вікно	Мазут / Двокамерне ПВХ-вікно	Мазут / Трикамерне ПВХ-вікно
CC	кг CO ₂ -екв	343.51	122.18	133.83	47.57	183.40	65.18
OD	кг CFC-11-екв	0.000013	0.000005	0.000010	0.000004	0.000059	0.000021
TA	кг SO ₂ -екв	1.6913	0.6016	0.6847	0.2427	0.5809	0.2061
FE	кг P-екв	0.0187	0.0067	0.0008	0.0003	0.0020	0.0007
ME	кг N-екв	0.0161	0.0057	0.0042	0.0015	0.0109	0.0039
HT	кг 1,4 DB-екв	18.9376	6.7356	12.5828	4.4593	6.0124	2.1345
POF	кг NMVOC	1.9066	0.6781	0.2303	0.0817	0.3898	0.1383
PMF	кг PM10-екв	0.7140	0.2540	0.1565	0.0555	0.1713	0.0608
TET	кг 1,4-DB-екв	0.0077	0.0027	0.0126	0.0045	0.0059	0.0020
FET	кг 1,4-DB-екв	0.0269	0.0096	0.8325	0.2950	0.1426	0.0506
MET	кг 1,4-DB-екв	0.0764	0.0272	0.2544	0.0902	0.1153	0.0409
IR	кБк U235-екв	1.1337	0.4033	0.7624	0.2708	20.9055	7.4131
ALO	м ² рік	7.1221	2.5335	0.3052	0.1084	0.7935	0.2816
ULO	м ² рік	3.9871	1.4182	0.1166	0.0414	0.5473	0.1942
NLT	м ²	0.0248	0.0088	0.0266	0.0094	0.1153	0.0409
WD	м ³	0.2379	0.0846	0.0678	0.0241	0.5753	0.2040
MD	кг Fe-екв	2.4680	0.8779	1.8056	0.6414	4.3423	1.5428
FD	кг нафт. екв	123.15	43.81	80.19	28.41	112.28	39.81

Використання алюмінієвих вікон (варіант 0) є більш екологічним, оскільки вони забезпечують енергозбереження. Найбільший екологічний слід мають двокамерні ПВХ-вікна, незалежно від типу палива.

Аналіз показав, що позитивний вплив від зменшення споживання палива не компенсує негативного впливу від виробництва алюмінієвих вікон у всіх категоріях. Для деяких показників (світловодна евтрофікація, токсичність для людини, прісноводна та морська екотоксичність, іонізуюче випромінювання, виснаження металів) різниця між варіантами занадто мала, щоб перекрити шкоду від виробництва.

Наприклад, у категорії зміна клімату (CC) виробництво алюмінієвих вікон утворює на 48,4 кг CO₂-екв більше, ніж ПВХ-двоглазкових, але екологічна вигода (зменшення викидів за рахунок меншого спалювання палива) становить 343,5 кг CO₂-екв за 25 років. Отже, для індексів CC, TET, NLT, FD, WD екологічний ефект від економії енергії повністю компенсує негативний ефект виробництва.

За аналізом ReCiPe EndPoint загальний екологічний ефект (EI) показав, що встановлення алюмінієвих вікон з коефіцієнтом теплопередачі $U_w = 0.82 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ дає значні переваги.

Для опалення вугіллям:

- у порівнянні з ПВХ-двоглазковими — +66.57 Pt,
- у порівнянні з ПВХ-потрійними — +23.68 Pt.

Для природного газу:

- +31.66 Pt (двокамерні ПВХ),
- +11.23 Pt (потрійні ПВХ).

Для мазуту:

- +44.01 Pt (двокамерні ПВХ),
- +15.62 Pt (потрійні ПВХ).

Таким чином, додаткові витрати ресурсів на підвищення теплоізоляції вікон повністю виправдані

На рисунку 4.5 показано повний екологічний баланс виробництва та експлуатації ПВХ-вікон порівняно з алюмінієвими для трьох типів палива. Негативний ефект виробництва алюмінієвих вікон компенсується для всіх енергоносіїв. З урахуванням усього терміну служби (50 років для алюмінію, 25 — для ПВХ), алюмінієві вікна демонструють позитивний екологічний баланс у всіх категоріях.

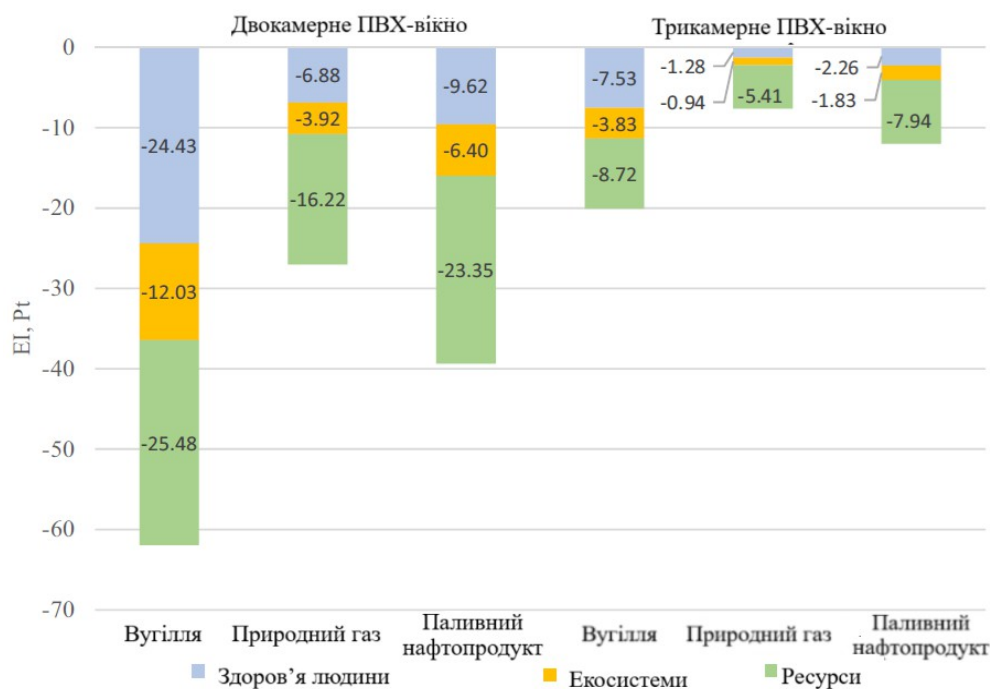


Рисунок 4.5 - Екологічний баланс виробництва та експлуатації ПВХ-вікон у порівнянні з алюмінієвими вікнами.

Виробництво й експлуатація двокамерних ПВХ-вікон збільшують негативний вплив порівняно з алюмінієвими на:

- 61.9 Pt — при опаленні вугіллям,
- 27.0 Pt — при опаленні газом,

- 39.3 Pt — при опаленні мазутом.

Для потрійних ПВХ-вікон екологічні втрати становлять:

- 20.0 Pt (вугілля),
- 7.6 Pt (газ),
- 12.0 Pt (мазут).

Результати показали, що екологічні втрати від виробництва вікон з кращими теплоізоляційними характеристиками повністю компенсуються під час їх експлуатації, незалежно від типу палива.

Екологічна вигода від використання алюмінієвих вікон порівняно з двокамерними ПВХ становить від 27.0 до 61.9 Pt, залежно від системи опалення. Найбільші переваги спостерігаються при використанні вугілля.

Двокамерні ПВХ-вікна слід поступово виводити з виробництва. Одночасно необхідно модернізувати сектор опалення, переходячи від викопного палива до екологічно чистіших джерел відповідно до вимог Європейського “Зеленого курсу”.

Категорія “Ресурси” залишається домінуючою у структурі впливу — це свідчить про виснаження природних ресурсів, головним чином через використання викопного палива.

У контексті енергетичного переходу результати дослідження можуть бути використані для порівняльного аналізу впливу аналогічних вікон, але при опаленні з використанням відновлюваних джерел енергії. Такі дослідження дозволять кількісно оцінити вигоди від модернізації систем опалення житлових будівель. Проведений LCA-аналіз є корисним для виробників, архітекторів і інвесторів, які шукають рішення для підвищення енергоефективності будівель та зменшення їхнього впливу на довкілля.

РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАМІНИ ВІКОН ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ВІКНА З ПОЛІВІНІЛХЛОРИДНИХ ПРОФІЛІВ (ПВХ)

5.1 Енергоефективність сучасних віконних систем

Одним із найважливіших напрямів енергозбереження в житловому секторі є зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції будівель, зокрема через вікна. Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі спрямовані на досягнення максимальної енергоефективності та екологічності споруд. У зв'язку з цим значного поширення набуває заміна старих дерев'яних або алюмінієвих вікон на енергоощадні конструкції з полівінілхлориду (ПВХ).

Вікна з ПВХ-профілів поєднують високі теплоізоляційні властивості, довговічність, герметичність, простоту обслуговування та доступну вартість. З економічної точки зору така заміна дає змогу суттєво скоротити витрати на опалення, підвищити комфорт у приміщеннях і збільшити ринкову вартість житла.

Вікна є одним із головних джерел тепловтрат у житлових будівлях. За оцінками фахівців, частка втрат через віконні прорізи може становити до 35–40% загальних теплових втрат. Це зумовлено як низькими теплоізоляційними характеристиками старих дерев'яних рам, так і негерметичністю стиків.

ПВХ-вікна характеризуються низьким коефіцієнтом теплопередачі (U), який у середньому становить 0,9–1,3 Вт/м²·К, тоді як у старих дерев'яних конструкцій він сягає 2,5–3,0 Вт/м²·К. Завдяки цьому втрати тепла через вікна зменшуються в 2–3 рази.

Сучасні системи скління — дво- або трикамерні склопакети з енергозберігаючим напиленням, заповнені аргоном або криптоном, забезпечують підвищену теплоізоляцію та звукоізоляцію. Важливою перевагою є можливість адаптації конструкцій до кліматичних умов України: для

північних і східних регіонів доцільно застосовувати тришарові пакети, для південних — двошарові. Таким чином, заміна старих вікон на енергоефективні ПВХ-конструкції безпосередньо впливає на скорочення споживання теплової енергії та зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу.

5.2 Економічні переваги заміни старих вікон на металопластикові

Основним економічним аргументом на користь заміни вікон є зменшення витрат на опалення. За результатами енергоаудитів житлових будинків, модернізація вікон дозволяє зменшити тепловтрати на 15–25%, що забезпечує економію близько 100–150 кВт·год/м² на рік [47].

В умовах постійного зростання цін на енергоносії така економія має суттєвий фінансовий ефект. Орієнтовний термін окупності інвестицій у заміну вікон становить 4–6 років для індивідуальних будинків та 6–8 років — для багатоквартирних [47-48].

Додаткові економічні вигоди включають:

- зменшення витрат на ремонт і фарбування рам (на відміну від дерев'яних конструкцій);
- збільшення вартості нерухомості після модернізації;
- можливість участі у програмах державної підтримки енергоефективності («Енергодім», місцеві програми термомодернізації).
- Економічна доцільність заміни вікон полягає не лише у прямій фінансовій вигоді за рахунок зменшення витрат на опалення, а й у підвищенні ринкової вартості житла, покращенні умов проживання та зниженні навантаження на довкілля. Для обґрунтування цього твердження доцільно розглянути конкретний приклад розрахунку.

Розрахунок економічної доцільності заміни вікон

Для оцінки ефективності модернізації приймаємо такі умовні параметри типового житлового приміщення:

- опалювана площа квартири — 60 м²;
- площа вікон — 10 м²;
- середня різниця температур між внутрішнім і зовнішнім повітрям у період опалювального сезону — 20 °С;
- тривалість опалювального сезону — 180 днів (4320 годин);
- коефіцієнт теплопередачі старих дерев'яних вікон — 2,8 Вт/м²·К;
- коефіцієнт теплопередачі нових ПВХ-вікон із двокамерним склопакетом — 1,1 Вт/м²·К;
- середня вартість теплової енергії — 3,2 грн/кВт·год;
- орієнтовна вартість заміни вікон — 27 000 грн.

Розрахунок тепловтрат через віконні конструкції проводиться за формулою:

$$Q = U \times A \times \Delta T \times t / 1000,$$

де

Q — річні тепловтрати, кВт·год;

U — коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·К;

A — площа вікна, м²;

ΔT — середня різниця температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем, °С;

t — тривалість опалювального періоду, год.

Для старих дерев'яних вікон тепловтрати становлять:

$$Q(\text{дер}) = 2,8 \times 10 \times 20 \times 4320 / 1000 = 24\,192 \text{ кВт·год/рік.}$$

Для сучасних ПВХ-вікон отримаємо:

$$Q(\text{ПВХ}) = 1,1 \times 10 \times 20 \times 4320 / 1000 = 9\,504 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Таким чином, річна економія енергії внаслідок заміни вікон становить:

$$E = 24\,192 - 9\,504 = 14\,688 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

У грошовому еквіваленті річна економія на опаленні дорівнює:

$$S = 14\,688 \times 3,2 = 47\,000 \text{ грн/рік}.$$

Отримані дані свідчать, що економія енергоресурсів є суттєвою навіть за консервативних умов розрахунку. Враховуючи інвестиційні витрати в розмірі 27000 грн, термін окупності проєкту становить менше одного року. Навіть у випадку нижчої вартості енергії або коротшого опалювального сезону, окупність не перевищуватиме 2–3 років, що підтверджує високий рівень економічної ефективності заходу.

Окрім безпосереднього зменшення витрат на енергію, модернізація вікон зменшує потребу в ремонті рам, фарбуванні, герметизації швів. На відміну від дерев'яних конструкцій, ПВХ-вікна не потребують періодичного обслуговування, стійкі до впливу вологи, ультрафіолету та перепадів температур. Це дозволяє скоротити експлуатаційні витрати щонайменше на 60–70%.

Додатковою перевагою є підвищення вартості житла. Згідно з даними агентств нерухомості, квартири, у яких проведено енергомодернізацію, продаються на 5–10% дорожче. Окрім економічного ефекту, мешканці отримують покращений комфорт — стабільну температуру приміщення, відсутність протягів і конденсату, кращу звукоізоляцію [53].

5.3 Соціально-економічні та екологічні аспекти термомодернізації житлових будівель

Питання енергоефективності будівель тісно пов'язане з національними цілями сталого розвитку. За оцінками фахівців, житловий сектор України споживає понад 30% усієї енергії країни, а більша частина цього споживання припадає на опалення. Зменшення тепловтрат через вікна на 20–30% може знизити загальне енергоспоживання будівельного сектору на 5–7%, що еквівалентно скороченню викидів CO₂ на сотні тисяч тонн щороку [49-52].

Встановлення сучасних вікон також сприяє покращенню якості життя населення. У будинках із застарілими вікнами часто спостерігаються проблеми з вологістю, конденсацією, грибком і шумовим забрудненням. Після заміни вікон ці фактори зменшуються, що позитивно впливає на здоров'я мешканців та підвищує санітарно-гігієнічний комфорт житла.

Важливою складовою державної політики у сфері енергоефективності є програми фінансової підтримки, такі як «Енергодім», місцеві програми термомодернізації або «Теплі кредити». Вони дають змогу компенсувати частину вартості робіт і скоротити термін окупності до 2–3 років навіть у багатоквартирних будинках, де витрати на модернізацію вищі.

Для оцінки економічної ефективності доцільно враховувати не лише первісну вартість вікон, але й витрати протягом усього життєвого циклу — від виробництва до утилізації.

Таблиця 5.1 - Оцінка вартості життєвого циклу вікон (умовні дані)

Тип вікна	Початкова вартість, грн/м ²	Витрати на обслуговування за 20 років, грн	Економія на опаленні, грн/рік	Окупність, років
Дерев'яне	2 000	4 000	0	-
Алюмінієве	3 200	2 500	400	7,5
ПВХ-вікно	2 500	1 200	700	4,5

Як видно з таблиці, ПВХ-вікна мають найнижчий сумарний показник витрат за весь життєвий цикл і найшвидшу окупність.

Проведений аналіз свідчить, що заміна старих вікон у житлових будівлях на сучасні ПВХ-конструкції є економічно доцільним та екологічно обґрунтованим заходом.

Основні переваги:

- скорочення енергоспоживання на 15–25%;
- зниження викидів CO₂;
- економія коштів домогосподарств;
- підвищення довговічності та надійності віконних систем.

Такі заходи відповідають європейським тенденціям розвитку «зеленого» будівництва та стратегічним цілям України у сфері енергоефективності.

Результати проведеного аналізу свідчать, що заміна вікон є одним із найбільш ефективних заходів енергомодернізації житлових будівель. Вона забезпечує швидку окупність інвестицій, стабільну економію ресурсів і зменшення навантаження на енергосистему країни. За оцінками енергоаудитів, загальні тепловтрати будівлі після заміни вікон можуть зменшитися на 15–25%, що забезпечує економію 100–150 кВт·год/м² на рік. У грошовому вираженні це відповідає кільком тисячам гривень щорічно для середньої квартири.

РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ ПОТЕНЦІЙНИХ ЗАГРОЗ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛОПЛАСТИКОВИХ ВІКОН НА ПІДПРИЄМСТВІ VIGRANT (М. МИКОЛАЇВ)

6.1 Аналіз стану охорони праці на підприємстві ViGrand (м. Миколаїв)

Аналіз стану охорони праці на підприємстві ViGrand, показує, що компанія приділяє значну увагу безпеці праці своїх працівників. Зокрема, на виробничих дільницях зварювання метало-пластикових вікон та дверей встановлені системи вентиляції, які забезпечують видалення шкідливих парів з робочої зони. На додаток до цього, всі працівники мають змогу скористатися індивідуальними засобами захисту (ІЗЗ), такими як маски, рукавиці, 18 спецодяг тощо. Крім того, на кожній дільниці працює медична сестра, яка забезпечує першу медичну допомогу у разі необхідності. Однак, при аналізі стану охорони праці на підприємстві ViGrand, були виявлені деякі недоліки. Наприклад, на деяких дільницях відсутній належний порядок зберігання інструментів та матеріалів, що може призвести до травматизму працівників. Крім того, на деяких дільницях недостатньо освітлення, що може призвести до порушення зору працівників та збільшення ризику нещасних випадків на виробництві. Іншим недоліком є те, що компанія не проводить достатньо часто навчання своїх працівників з охорони праці та не забезпечує їх регулярним медичним оглядом. Це може призвести до порушення здоров'я працівників та погіршення їх робочих результатів. Що стосується переваг системи охорони праці на підприємстві ViGrand, то можна виділити наступні:

- Система охорони праці на підприємстві є комплексною, тобто охоплює всі аспекти виробничої діяльності, включаючи планування роботи, навчання працівників, забезпечення безпеки робочого місця, медичний контроль і т.д.
- Підприємство має розвинену систему інструктажу та навчання працівників, що допомагає знизити ризик виникнення травм і нещасних випадків на робочому місці.

- Встановлено сучасне обладнання для забезпечення безпеки працівників. Наприклад, системи вентиляції та кондиціонування повітря допомагають запобігти ризику виникнення отруєння в результаті зварювання або роботи з фанерою.
- Підприємство регулярно проводить планові перевірки і аудити, щоб визначити, наскільки ефективна є система охорони праці та чи потребує вона додаткового вдосконалення.

6.2 Аналіз потенційних загроз у виробничих процесах виготовлення металопластикових виробів

Процес виготовлення металопластикових конструкцій супроводжується низкою виробничих етапів, які несуть потенційну небезпеку для здоров'я та безпеки працівників. Ці операції можуть стати причиною виробничих травм або професійних захворювань. До основних небезпечних процесів належать:

- Операції з різання профілів та склопакетів. Зазвичай ці дії виконуються за допомогою спеціального ріжучого обладнання — пилок, абразивних кругів, лез тощо. Недотримання правил техніки безпеки, зокрема ігнорування використання індивідуальних засобів захисту, таких як захисні окуляри, рукавиці та респіратори, може призвести до порізів, травм від уламків матеріалу та інших ушкоджень.
- Зварювальні роботи з профілями. Цей процес передбачає застосування високих температур і розігрітих матеріалів, що створює ризик термічних опіків. Щоб уникнути небезпеки, працівники повинні користуватися захисними шоломами, спеціальними окулярами, термостійкими рукавицями та іншими засобами індивідуального захисту.
- Монтажні роботи. Під час встановлення готових виробів працівники мають справу з важкими конструкціями, які можуть впасти або спричинити защемлення. Крім того, існує ризик падіння з висоти, тому необхідно застосовувати страхувальні пояси та інші пристрої для захисту від падіння.

- Експлуатація виробничого обладнання. У процесі виготовлення металопластикових виробів використовується широкий спектр технічних засобів — верстати для різання, пресове обладнання, зварювальні установки тощо. Особливо небезпечною є операція розпилювання профілів на задану довжину, яка виконується на пильному верстаті з високошвидкісними лезами. Недотримання вимог безпеки може призвести до серйозних травм — порізів, втрати пальців, ушкодження очей тощо.
- Зварювання для з'єднання металопластикових елементів. Цей процес супроводжується інтенсивним тепловим випромінюванням, що може спричинити опіки, забруднення шкіри та пошкодження очей. Крім того, під час зварювання можливе виділення шкідливих речовин у повітря, що становить загрозу для навколишнього середовища та потребує відповідного контролю.
- Механічна обробка профілів і склопакетів. Цей етап також пов'язаний із застосуванням різучих інструментів, що створює ризик виникнення порізів та інших травм. Щоб мінімізувати ці ризики, необхідно суворо дотримуватись правил безпеки, забезпечити належне освітлення та вентиляцію робочої зони, а також обов'язково використовувати засоби індивідуального захисту.

Крім того, існує ризик виникнення пожежі під час робіт зі зварювання металопластикових конструкцій. Для запобігання виникненню пожеж необхідно дотримуватись правил з використанням зварювального обладнання, забезпечити належний рівень освітлення та провітрювання робочого простору, а також забезпечити наявність вогнегасників та інших засобів пожежогасіння.

Варто наголосити, що більшість зазначених небезпек можна попередити шляхом впровадження чітко регламентованих процедур безпеки. Всі працівники повинні бути ознайомлені з потенційними ризиками, проходити відповідне навчання щодо використання захисного спорядження (масок, рукавиць, окулярів тощо), а також дотримуватись встановлених норм і правил. Не менш

важливим є регулярний технічний огляд обладнання на відповідність вимогам безпеки та постійний контроль за дотриманням охоронних заходів на робочому місці.

Таблиця 6.1. Небезпечно виробничі процеси і операції виробництва металопластикових виробів на підприємстві

№	Небезпечно виробничий процес/операція	Опис ризику	Заходи безпеки
1	Робота з високотемпературними матеріалами	Висока температура може спричинити опіки	- Носити захисні рукавиці та одяг з вогнестійкими властивостями - Використовувати термостійку підставку для матеріалів - Застосовувати ізольовані інструменти
2	Робота з різальними інструментами	Ризик порізів та травматизму	- Носити захисні окуляри та рукавиці - Ретельно виконувати правила безпеки при роботі з інструментами - Уникати використання пошкодженого або тупого інструменту
3	Робота з хімічними речовинами	Небезпека отруєння, опіків або запалення	- Використовувати особистий захисний екіпірунок (озонований халат, рукавиці, окуляри)
4	Робота з електричними джерелами	Ризик ураження електричним струмом	- Використовувати ізольовані інструменти - Проводити регулярну перевірку електричного обладнання

6.3 Моделювання травмонебезпечних ситуацій під час зварювання деталей металопластикових вікон

Явища, що створюють небезпечну ситуацію (НС), складаються за умови комбінації небезпечних умов (НУ) та небезпечних дій (НД). Внаслідок одночасного прояву небезпечної ситуації може виникнути аварія (А), що може

призвести до травмування (Т) працівника. Отже, явища формування небезпечних ситуацій відносяться до випадкових явищ. Для запобігання існуючим і потенційним небезпекам необхідно моделювати процеси формування, виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідків. Одним із найбільш небезпечних виробничих процесів на підприємстві ViGrand, що займається виготовленням металопластикових вікон, є процеси демонтажу, монтажу та балансування віконних конструкцій. Роботи з демонтажу, монтажу та балансування вікон входять до "Переліку робіт з підвищеною безпекою...". Ці послуги є дуже популярними серед клієнтів ViGrand і приносять значні прибутки. Тому відмовитися від них через небезпечність не є варіантом. Але необхідно забезпечити умови для уникнення аварій та травм. Для цього буде проведено моделювання процесів формування ризиків під час демонтажу, монтажу та балансування віконних конструкцій. Під час виконання робіт з демонтажу, монтажу металопластикових вікон можуть виникати такі небезпечні та шкідливі виробничі ситуації. Одним із найбільш небезпечних виробничих процесів на підприємстві ViGrand, що займається виготовленням металопластикових вікон, є процеси демонтажу, монтажу та балансування віконних конструкцій. Роботи з демонтажу, монтажу та балансування вікон входять до "Переліку робіт з підвищеною безпекою". Ці послуги є дуже популярними серед клієнтів ViGrand і приносять значні прибутки. Тому відмовитися від них через небезпечність не є варіантом.

Таблиця 6.2 - Перелік небезпечних ситуацій, що спричиняють отруєння шкідливими газами при зварюванні металопластикових деталей

№ з/п	Зміст та характеристика небезпечної ситуації	Код	Примітка
1	Отруєння шкідливими газами при зварюванні вікон	НС1	
2	Палаючий газ, що утворюється під час зварювання, може бути небезпечним при недостатній вентиляції. Вдихання СО може призвести до отруєння, втрати свідомості або навіть смерті.	НС2	
3	Використання інертних газів, таких як аргон або гелій, для захисту дуги під час зварювання, може створити небезпеку займання або утруднити доступ до свіжого повітря, що призводить до ризику отруєння	НС3	
4	Деякі металопластикові деталі можуть містити ртуть, яка може випаровуватися під час зварювання. Вдихання парів ртуті може бути небезпечним для здоров'я.	НС4	
5	Під час зварювання утворюються металеві пілки та іскри, які можуть бути гарячими та небезпечними. Вони можуть призвести до опіків або запалення легкозаймистих матеріалів у робочому середовищі.	НС5	
6	Під час зварювання металопластикових деталей іноді використовуються газові контейнери. Неправильне використання або несправність таких контейнерів можуть призвести до викиду шкідливих газів у небезпечних концентраціях.	НС6	
7	Недостатня циркуляція свіжого повітря та відсутність належної вентиляції можуть призвести до накопичення шкідливих газів у робочій зоні, що збільшує ризик отруєння.	НС7	
9	Викиди шкідливих речовин у повітря	НС9	

Таблиця 6.3 - Перелік небезпечних виробничих умов під час отруєння шкідливими газами

№ п/п	Зміст та характеристика небезпечних виробничих умов	Код	Примітка
1	2	3	4
2	Робітник не пройшов навчання та атестацію	НУ1	
3	Робітник перед призначенням на роботу не пройшов медичний огляд	НУ3	
4	Робітник перед допуском до роботи не пройшов вступний та первинний інструктаж з охорони праці, а також перевірку знань щодо вимог безпеки під час виконання робіт	НУ4	
5	Обладнання, під час роботи якого виділяються шкідливі речовини, не обладнане місцевою вентиляцією	НУ5	
6	Пристрої, пристосування та інструмент, що застосовуються при виконанні робіт, не відповідають виду робіт, або несправні	НУ6	
7	Робітник не забезпечений засобами індивідуального захисту	НУ7	
9	Редуктор на стенді не закритий кожухом	НУ9	
11	Редуктор на стенді не закритий кожухом	НУ11	
12	Забруднення виробничих приміщень шкідливими речовинами	НУ12	
13	Несанкціонований доступ до обладнання або зони обробки	НУ13	

Під час виконання робіт робітників під час отруєння шкідливими газами можуть виникати небезпечні дії робітників, які подано у табл. 2.3.

Таблиця 6.4 - Перелік небезпечних дій робітників під час отруєння шкідливими газами

№ п/п	Зміст та характеристика небезпечних дій робітників	Код	Примітка
1	2	3	4
1	Робітник не знає і не виконує вимоги інструкції з охорони праці і нормативні акти про охорону праці, пожежної безпеки, правила поводження з машинами, механізмами, устаткуванням, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту	НД1	
2	Робітник не володіє навиками і прийомами безпечного виконання робіт з демонтажу, монтажу металопластикових вікон	НД2	
3	Робітник перед роботою не оглянув добре робоче місце, не прибрав всі непотрібні предмети, що заважають роботі працівника	НД3	
4	Робітник перед роботою не перевіряв справність інструментів і пристосувань, не розташував матеріали в зручному і безпечному для користування порядку	НД4	
5	Робітник перед роботою не перевіряв справність технологічного устаткування	НД5	
6	Робітник перед роботою не перевіряв справність загально-обмінної і місцевої вентиляції	НД6	
7	Робітник перед роботою не перевіряв освітлення робочого місця (зони)	НД7	
8	Робітник не доповів заступнику директора з виробництва про виявленні несправності чи недоліки обладнання, які перешкоджають безпечній роботі	НД8	
9	Робітник приступив до роботи при несправності вентиляції, устаткування, приладів, інструменту, освітлення на робочому місці	НД9	
10	Під час виконання робіт робітник працює не в спецодязі	НД10	
11	Робітник не знає і не виконує вимоги інструкції з охорони праці та нормативних актів	НД11	
12	Робітник не дотримує правил поводження з машинами, механізмами та устаткуванням	НД12	
13	Робітник не користується засобами колективного та індивідуального захисту	НД13	

Таблиця 6.5 - Перелік небезпечних ситуацій під час виробництва вікон

№ з/п	Зміст та характеристика небезпечної ситуації	Код	Примітка
1	Поранення від різця або інструментів	НС1	
2	Електричний удар від несправної електрообладнання	НС2	
3	Опік або травма шкіри від розплавленого пластику	НС3	
4	Травма внаслідок неправильного використання інструментів	НС4	
5	Травма внаслідок неправильного переміщення великогабаритних предметів	НС5	
6	Затиснення пальців або кінцівок у механізмах або виробничому обладнанні	НС6	
7	Впадання у зону впливу рухомих деталей машин або устаткування	НС7	
8	Пожежа або вибух у виробничих приміщеннях	НС8	
9	Несправність або вибух газового обладнання	НС9	

Таблиця 6.6 - Перелік небезпечних виробничих умов під час виробництва вікон

№ п/п	Зміст та характеристика небезпечних виробничих умов	Код	Примітка
1	2	3	4
1	Робітник не пройшов навчання та атестацію	НУ1	
2	До виконання робіт допущений робітник, який не досяг 18 років	НУ2	
3	Робітник перед призначенням на роботу не пройшов медичний огляд	НУ3	
4	Робітник перед допуском до роботи не пройшов вступний та первинний інструктаж з охорони праці, а також перевірку знань щодо вимог безпеки під час виконання робіт	НУ4	
5	Зсув важкого виробу або матеріалу	НУ5	
6	Пристрої, пристосування та інструмент, що застосовуються при виконанні робіт, не відповідають виду робіт, або несправні	НУ6	
7	Робітник не забезпечений засобами індивідуального захисту	НУ7	
8	Несанкціонований доступ до обладнання або зони обробки	НУ8	
9	Редуктор на стенді не закритий кожухом	НУ9	
10	На ободі є тріщини, гострі кромки і задирки, іржа у місці контакту з шиною	НУ10	

Таблиця 6.7 - Перелік небезпечних дій робітників під час виробництва

ВІКОН

№ п/п	Зміст та характеристика небезпечних дій робітників	Код	Примітка
1	2	3	4
1	Робітник не знає і не виконує вимоги інструкції з охорони праці і нормативні акти про охорону праці, пожежної безпеки, правила поводження з машинами, механізмами, устаткуванням, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту	НД1	
2	Робітник не володіє навиками і прийомами безпечного виконання робіт з виробництва металопластикових вікон	НД2	
3	Робітник перед роботою не оглянув добре робоче місце, не прибрав всі непотрібні предмети, що заважають роботі працівника	НД3	
4	Робітник перед роботою не перевіряв справність інструментів і пристосувань, не розташував матеріали в зручному і безпечному для користування порядку	НД4	
5	Робітник перед роботою не перевіряв справність інструментів і пристосувань, не розташував матеріали в зручному і безпечному для користування порядку	НД5	
6	Робітник перед роботою не перевіряв справність загально-обмінної і місцевої вентиляції	НД6	
7	Робітник перед роботою не перевіряв освітлення робочого місця (зони)	НД7	
8	Робітник не доповів заступнику директора з виробництва про виявленні несправності чи недоліки обладнання, які перешкоджають безпечній роботі	НД8	
9	Робітник приступив до роботи при несправності вентиляції, устаткування, приладів, інструменту, освітлення на робочому місці	НД9	
10	Під час виконання робіт робітник працює не в спецодязі	НД10	
11	Робітник не знає і не виконує вимоги інструкції з охорони праці та нормативних актів	НД11	
12	Робітник не дотримує правил поводження з машинами, механізмами та устаткуванням	НД12	
13	Робітник не користується засобами колективного та індивідуального захисту	НД13	
14	Робітник не виконує вимоги щодо пожежної безпеки	НД14	

Для запобігання виникненню небезпечних ситуацій необхідно забезпечити організацію та проведення навчання працівників, а також їх щорічну атестацію. Важливо здійснювати перевірку знань працівників щодо вимог безпеки під час виконання робіт, пов'язаних із демонтажем та монтажем конструкцій.

Розглянемо найбільш імовірні ризикові ситуації, що можуть виникнути під час роботи з металопластиковими вікнами. До таких ситуацій належать: травмування працівника, який отримав ушкодження у процесі роботи з вертикальним верстатом, а також випадки травмування, що можуть статися при потраплянні рук у робочий орган інструмента.

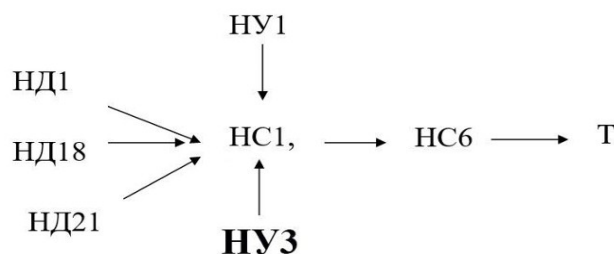


Рисунок 6.1 - Модель отруєння працівника шкідливими газами

Небезпечною ситуацією, що може виникнути під час виробництва металопластикових вікон, є неправильне використання розпалювальних пристроїв у процесі зварювання профілів.

Опис ситуації:

- Працівник виконує зварювання металопластикових профілів.
- Він користується розпалювальним пристроєм без попереднього проходження відповідного навчання та інструктажу з охорони праці.
- Через відсутність досвіду працівник неправильно налаштовує параметри зварювання, що призводить до неконтрольованого розпалювання газу.
- У результаті цього виникає пожежа, яка становить загрозу життю людей та може спричинити матеріальні збитки.

Шляхи запобігання та усунення небезпечної ситуації:

- Забезпечити проведення належного навчання та інструктажу для всіх працівників, які виконують зварювальні роботи з металопластиковими профілями.
- Ознайомити працівників із правилами безпечного користування розпалювальними пристроями, включно з правильним налаштуванням параметрів зварювання та контролем за витоком газу.
- Обладнати робочі місця засобами пожежогасіння (вогнєгасниками, пожежними ковдрами, піском тощо) та навчити працівників користуватися ними.
- Регулярно здійснювати технічне обслуговування та перевірку справності розпалювальних пристроїв для забезпечення їх безпечної експлуатації.

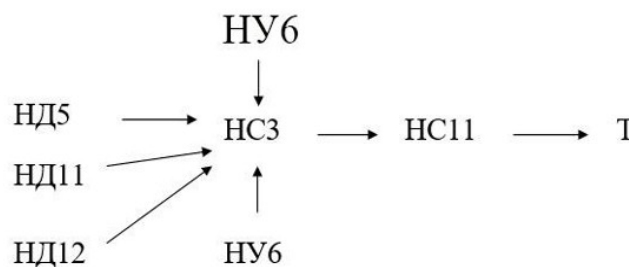


Рисунок 6.2 - Модель травмування працівника при виробництві вікон

За результатами моделювання небезпечних ситуацій у виробничих процесах виготовлення металопластикових отримані наступні результати

1. У результаті проведення структурно-функціонального аналізу процесу зварювання металопластикових виробів встановлено, що цей процес складається з таких основних структурних елементів: зварювальної машини, матеріалів для зварювання, обладнання для попередньої обробки деталей, безпосереднього процесу зварювання та контролю якості зварного з'єднання.

2. У процесі зварювання застосовується спеціальна зварювальна машина, яка включає низку функціональних елементів: електроди, привід, блок керування, систему охолодження тощо. Вона забезпечує необхідну потужність зварювання, точність розташування зварювальних елементів та стабільність параметрів, що впливають на якість зварного з'єднання.
3. Важливу роль у процесі відіграють матеріали для зварювання, які мають свої функціональні характеристики. Основними матеріалами для зварювання металопластикових виробів є ПВХ-плівка та спеціальний електрод, що забезпечують міцність і герметичність зварного шва.
4. До структурних елементів процесу зварювання належить також обладнання для попередньої обробки деталей, зокрема пістолет для зняття оксидного шару з поверхні. Його використання сприяє покращенню адгезії матеріалів і підвищенню якості зварного з'єднання.
5. Процес зварювання складається з кількох етапів, кожен з яких має важливе значення для забезпечення якості та безпеки праці. Особливу роль відіграють підготовчі роботи: організація робочого місця, очищення поверхонь деталей, перевірка обладнання та забезпечення належного освітлення. Дотримання цих вимог дозволяє запобігти виникненню небезпечних ситуацій і гарантує стабільну якість зварювання.
6. На підприємстві важливе значення має ефективна система вентиляції, оскільки під час зварювання металопластикових виробів у повітря можуть виділятися шкідливі речовини. Необхідно визначити оптимальне розташування вентиляційних отворів, які забезпечать належний повітрообмін і запобігатимуть накопиченню забруднень у приміщенні. Доцільно застосовувати фільтри у вентиляційній системі для очищення повітря від пилу, алергенів та інших домішок. Важливо також забезпечити контроль рівня вологості у приміщенні шляхом використання вентиляторів або осушувачів повітря, що допоможе знизити ризик утворення плісняви та грибка.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що ПВХ, який використовується для виготовлення металопластикових вікон, має високі експлуатаційні властивості та довговічність, однак його виробництво й модифікація потребують застосування хімічних добавок і енергоємних технологій, що може спричиняти негативний вплив на навколишнє середовище. Складність технологічного процесу та багатокомпонентність рецептури також впливають на рівень екологічного навантаження на різних етапах життєвого циклу, що обґрунтовує необхідність подальшої детальної екологічної оцінки.

2. Встановлено, що за 2021–2025 рр. виробництво металопластикових вікон в Україні коливалося від 4,2 млн одиниць у 2021 до 2,5–2,8 млн у 2022 (–35–40 %), а у 2023–2024 рр. відновилося до 3,7–4,1 млн одиниць.

3. На основі аналізу виробничих процесів ViGrand (м, Миколаїв), що включають екструзію, охолодження, обробку та складання з потужністю 1500–2000 виробів/змін визначено основні забруднювачі: CO₂, NO_x, SO_x, HCl, VOC, пил TiO₂ та CaCO₃. Висока автоматизація та контроль якості зменшують викиди та створюють умови для утилізації ПВХ-відходів.

4. Визначено методи оцінки впливу виробництва металопластикових вікон на довкілля - ReCiPe MidPoint та EndPoint. Вони дозволяють оцінювати 8 ключових категорій впливу та інтегрувати їх у 3 об'єкти шкоди — здоров'я людини, стан екосистем і використання ресурсів. Створено покроковий план оцінки показників ReCiPe MidPoint та EndPoint. Завдяки науково обґрунтованим базам даних і програмним платформам (SimaPro, OpenLCA), ці методи забезпечують достовірну та комплексну оцінку життєвого циклу продукції, що робить їх придатними для даного дослідження.

5. Загальний огляд життєвого циклу вікон у житлових будівлях та визначені ключові чинники, що впливають на їхній екологічний вплив та межі системи оцінки життєвого циклу (cradle-to-gate), які охоплюють процеси від

різання профілів до контролю якості показали, що теплоізоляційні характеристики вікон безпосередньо впливають на споживання енергії для опалення та пов'язаний з цим рівень викидів парникових газів. Встановлено, що типи систем опалення та вид палива є фактором, що визначає загальний екологічний баланс будівель.

6. Результати визначення зваженого екологічного впливу виробництва трьох типів вікон: алюмінієвого тришарового ($U_w = 0,82$), ПВХ тришарового ($U_w = 0,92$) та ПВХ двошарового ($U_w = 1,10$) свідчать, що найнижчий екологічний вплив характерний для двошарового ПВХ-вікна, яке має гірші теплоізоляційні властивості. Покращення ізоляції за рахунок збільшення кількості склопакетів до трьох підвищує екологічне навантаження на виробництво на $\sim 14\%$.

7. Розрахунки оцінки життєвого циклу трьох типів вікон: алюмінієвого тришарового ($U_w = 0,82$), ПВХ тришарового ($U_w = 0,92$) та ПВХ двошарового ($U_w = 1,10$) за методикою оцінки життєвого циклу відповідно до стандартів ISO 14040–14049 із використанням програмного забезпечення SimaPro показали, що вікна з кращою теплоізоляцією суттєво зменшують теплові втрати будівлі. За 25 років експлуатації на 1 м^2 віконної поверхні алюмінієве тришарове вікно економить найбільше енергії, ПВХ тришарове — близько на 15–20 % більше, ніж ПВХ двошарове. Використання тришарових вікон дозволяє скоротити витрати на опалення, знизити викиди CO_2 та підвищити енергоефективність житлових будівель.

СИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Левицький В., Ларук Ю., Гуменецкий Т., Сікора Я. The influence of polystyrene modifier and plasticizer nature on the properties of poly(vinyl chloride) // Chemistry & Chemical Technology. – 2015. – Vol. 9, № 2. – P. 199–203. – Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/items/794dd048-26bb-4a68-93ac-f4c9c91bb300> – Дата звернення: 10.11.2025
2. Masyuk A. S., Katruk D. S., Levytskyi V. Ye. Modified polyvinyl chloride composites with metal-containing polymer-silicate fillers // 2021. – Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/items/1fffc7e4-75b5-4df1-ac4e-697c2aaa0e61> – Дата звернення: 12.11.2025
3. Srijunpetch N. Polymerization of Polyvinyl Chloride, Polyvinyl Chloride Blends, Physical, Mechanical, Thermal, Chemical Properties and Applications of Polyvinyl Chloride // Advanced Science Journal. – 2024. – Vol. 24, № 2. – P. 1–21. – Режим доступу: <https://li02.tci-thaijo.org/index.php/adscij/article/view/656> – Дата звернення: 15.11.2025
4. Poly(vinyl chloride), a historical polymer still evolving // Polymer. – 2022. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386122010989> – Дата звернення: 15.11.2025
5. Polyvinyl Chloride — an overview // ScienceDirect Topics. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyvinyl-chloride> – Дата звернення: 15.11.2025
6. ДСТУ Б В.2.7-130-2007 «Профілі полівінілхлоридні для огорожувальних будівельних конструкцій. Загальні технічні умови.» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://fasadinfo.ua/articles/gosts/371> – Дата звернення: 15.12.2025

7. Мирзоев Р.Г., Кугушев И.Д., Брагинский В.А. Основы конструирования и расчёта деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления. — Л.: Машиностроение, 1972. — 416 с.
8. Sikora J. W., Samujło B., Stasiak A. The extrusion of plasticized poly(vinyl chloride) in an extruder with a modified feed zone // Journal of Polymer Engineering. — 2014. — Vol. 35, № 2. — Р. [сторінки] — Режим доступу: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/polyeng-2014-0133/html> — Дата звернення: 12.11.2025
9. Weng H.-H., J.-S. W. et al. Molten Pressure of Polyvinyl Chloride Under Processing Parameters in Counter-Rotating Twin-Screw Extrusion // Polymers. — 2025. — 17(21): 2809. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/21/2809> — Дата звернення: 15.11.2025
10. PVC Profile Extrusion Lines: Twin-Screw Process, Benefits & Applications // TwinScrew. — Режим доступу: <https://www.twinscrew.net/en/article/PVC-Profile-Extrusion-Lines.html> — Дата звернення: 12.11.2025
11. Типи екструдерів за кількістю та типом шнеків // Ten24.com.ua. — Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tipy-ekstrudero-v-po-kolichestvu-i-tipu-shnekov> — Дата звернення: 11.11.2025
12. Левицький В., Ларук Ю., Гуменецкий Т., Сікора Я. The influence of polystyrene modifier and plasticizer nature on the properties of poly(vinyl chloride) // Chemistry & Chemical Technology. — 2015. — Vol. 9, № 2. — Р. 199–203. — (дубль) — Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/items/794dd048-26bb-4a68-93ac-f4c9c91bb300> — Дата звернення: 15.12.2025
13. Srijunpetch N. Polymerization of Polyvinyl Chloride, Polyvinyl Chloride Blends, Physical, Mechanical, Thermal, Chemical Properties and Applications of Polyvinyl Chloride // Advanced Science Journal. — 2024. — Vol. 24, № 2. — Р. 1–21. — (дубль) — Режим доступу: <https://li02.tci-thaijo.org/index.php/adscij/article/view/656> — Дата звернення: 01.12.2025

14. Polyvinyl Chloride — an overview // ScienceDirect Topics. – (дубль) – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyvinyl-chloride> – Дата звернення: 15.12.2025
15. Poly(vinyl chloride), a historical polymer still evolving // Polymer. – (дубль) – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386122010989> – Дата звернення: 15.12.2025
16. Masłowski A., Kowalski A. Thermal stability of PVC and role of stabilizers // Polimery. – 2016. – Vol. 61, № 1. – P. 45–53. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386122010989> – Дата звернення: 15.12.2025
17. Ostrowski M., Jaworski J. PVC additives and their influence on processing and performance // Journal of Vinyl & Additive Technology. – 2018. – Vol. 24, № 4. – P. 345–352. – Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/vnl.21654> – Дата звернення: 12.11.2025
18. Аналітичний звіт: Ринок металопластикових вікон в Україні 2021–2025 рр. – Київ: UaBuild Analytics, 2023. – 48 с. – Режим доступу: <https://uabuild.com.ua/analytics/pvc-windows-market-2021-2025> – Дата звернення: 15.12.2025
19. Steko. Корпоративний звіт 2023: виробництво та ринки збуту. – Дніпро: ТОВ «Стеко», 2023. – Режим доступу: <https://steko.ua/uk/about/company/reports> – Дата звернення: 10.12.2025
20. Viknar'off. Звіт про діяльність та виробничі потужності 2023. – Тернопіль: ТОВ «Вікнар'Офф», 2023. – Режим доступу: <https://www.viknaroff.com.ua/uk/company/news> – Дата звернення: 11.12.2025
21. Open Tesc. Інформація про виробництво та продукцію. – Дніпро: ТОВ

- «Open Teck», 2023. – Режим доступу: <https://openteck.com.ua/production> – Дата звернення: 15.11.2025
- 22.WDS (Миропласт). Звіт про ринкову частку та виробничі потужності 2023. – Дніпро: ТОВ «Миропласт», 2023. – Режим доступу: <https://wds.ua/company> – Дата звернення: 12.11.2025
- 23.Aluplast Ukraine. Локалізоване виробництво та сертифікація продукції. – Київ: Aluplast Ukraine, 2023. – Режим доступу: <https://aluplast.ua/uk/about> – Дата звернення: 16.11.2025
- 24.Державна служба статистики України. Промислове виробництво в Україні 2021–2025. – Київ: Держстат, 2025. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/> – Дата звернення: 11.11.2025
- 25.ViGrand – Віконний завод : офіційний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vigrand.com.ua> – Дата звернення: 15.12.2025
- 26.Kowalczyk Z., Twardowski S., Malinowski M., Kuboń M. Life cycle assessment (LCA) and energy assessment of the production and use of windows in residential buildings [Electronic resource] // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Article 19752. – Режим доступу: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-47185-7> – Дата звернення: 15.12.2025
- 27.Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M.D.M., Hollander A., Zijp M., van Zelm R. ReCiPe2016: a harmonised life-cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [Electronic resource] // International Journal of Life Cycle Assessment. – 2017. – Vol. 22. – P. 138–147. – DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y> – Дата звернення: 12.11.2025
- 28.Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R. ReCiPe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises

- harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level [Electronic resource]. – Bilthoven: RIVM, 2009 (updated May 2013). – 194 p. – Режим доступу: https://web.universiteitleiden.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf – Дата звернення: 15.12.2025
- 29.RIVM. ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization [Electronic resource]. – Bilthoven: RIVM, 2016. – 194 p. – Режим доступу: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf> – Дата звернення: 10.12.2025
- 30.ESU-services. Description of life cycle impact assessment (LCIA) methods: overview including ReCiPe [Electronic resource]. – ESU-services Ltd., 2024. – Режим доступу: <https://esu-services.ch/fileadmin/download/tender/ESU-Description-of-LCIAMethods.pdf> – Дата звернення: 04.12.2025
- 31.Zhou Y., Ma M., Tam V. W. Y., Le K. N. Design variables affecting the environmental impacts of buildings: A critical review // Journal of Cleaner Production, 2023. – Article 387: 135921. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135921> – Дата звернення: 04.12.2025
- 32.Apostolopoulos V. et al. An integrated life cycle assessment and life cycle costing approach towards sustainable building renovation via a dynamic online tool // Applied Energy, 2023. – 334: 120710. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120710> – Дата звернення: 04.12.2025
- 33.Cassini M. Active dynamic windows for buildings: A review // Renewable Energy, 2018. – 119: 923–934. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049> – Дата звернення: 10.11.2025
- 34.Monteiro H., Freire F., Soares N. Life cycle assessment of a south European house addressing building design options for orientation, window sizing and building shape // Journal of Building Engineering, 2021. – 39: 102276. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102276> – Дата

звернення: 04.12.2025

- 35.Saadatian S., Rodrigues C., Freire F., Simões N. Key drivers of life-cycle environmental and cost assessment of windows for different European climate zones // Journal of Building Engineering, 2022. – 50: 104206. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104206> – Дата звернення: 10.11.2025
- 36.Intini F., Rospi G., Cardinale N., Kuhtz S., Dassisti M. Life cycle assessment of Italian residential windows: Sensitivity of analysis // International Journal of Heat and Technology, 2016. – 34S: 235–241. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18280/ijht.34S207> – Дата звернення: 15.12.2025
- 37.Salazar J. Life Cycle Assessment Case Study of North American Residential Windows [Електронний ресурс] // University of British Columbia, 2007. – Режим доступу: <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0066422> – Дата звернення: 15.12.2025
- 38.Saadatian S., Rodrigues C., Freire F., Simões N. Environmental and cost life-cycle approach to support selection of windows in early stages of building design // Journal of Cleaner Production, 2022. – 363: 132624. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132624> – Дата звернення: 15.12.2025
- 39.Bahramian M., Yetilmezso K. Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018) // Energy and Buildings, 2020. – 219: 109917. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917> – Дата звернення: 15.12.2025
- 40.PRé Sustainability. SimaPro Database Manual. Methods Library [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf> – Дата звернення: 15.12.2025

41. Babaizadeh H., Hassan M. Life cycle assessment of nano-sized titanium dioxide coating on residential windows // *Construction and Building Materials*, 2013. – 40: 314–321. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.083> – Дата звернення: 15.12.2025
42. Szul T. Application of a thermal performance-based model to prediction energy consumption for heating of single-family residential buildings // *Energies*, 2022. – 15: 362. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en15010362> – Дата звернення: 15.12.2025
43. Radhi H., Sharples S. Global warming implications of façade parameters: A life cycle assessment of residential buildings in Bahrain // *Environmental Impact Assessment Review*, 2013. – 38: 99–108. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.009> – Дата звернення: 15.12.2025
44. Zhou Y. et al. Unconventional smart windows: Materials, structures and designs // *Nano Energy*, 2021. – 90: 106613. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106613> – Дата звернення: 15.12.2025
45. Gramlick T. Choosing efficient windows // *Building Connection*, 2017. – (Winter): 22–23. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3316/informit.750199132557584> – Дата звернення: 15.12.2025
46. Buyle M., Braet J., Audenaert A. Life cycle assessment in the construction sector: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. – 26: 379–388. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001> – Дата звернення: 15.12.2025
47. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель».
48. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/> – Дата звернення: 15.12.2025

- 49.Енергетичний аудит житлових будівель: методичні рекомендації. – К.: 2020.
- 50.ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment (LCA).
- 51.Zajac J., Kowalski M. Life cycle assessment of PVC and aluminum windows // Journal of Building Physics, 2022.
- 52.European Commission. Green Deal: energy efficiency in buildings [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://commission.europa.eu> – Дата звернення: 11.12.2025
- 53.IFC. Дослідження енергоефективності житлових будинків України, 2021.
- 54.Науковий вісник будівництва. № 4, 2023. Стаття «Економічна ефективність термомодернізації».
- 55.Охорона праці під час зварювальних робіт // UEP.dn.ua [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uep.dn.ua/posts/ohorona/uk/bezopasnost-ohorona-praci-pid-cas-zvaruvalnih-robit-tehnika-bezpeki-pri-zvaruvanni.php> – Дата звернення: 09.12.2025
- 56.Health and Safety for Cutting and Welding of Plastics // TWI Global [Electronic resource]. – Режим доступу: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-are-there-any-health-and-safety-implications-of-cutting-and-welding-plastics> – Дата звернення: 09.12.2025