

Ратушняк Георгій Сергійович



Кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерних систем у будівництві Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна. Професор Міжнародної Кадрової Академії, академік Академії будівництва України. Заслужений працівник освіти України, лауреат першої міністерської премії «За досягнення в навчально-виховній та науково-педагогічній роботі» та лауреат обласної педагогічної премії.

Автор понад 580 науково-методичних праць, серед яких 10 монографій, 34 підручників та навчальних посібників, 110 авторських свідоцтв та патентів на винаходи. Внесений до іміджевого видання «Кращі науково-педагогічні працівники вищих закладів України». Відзначений Почесними грамотами Академії педагогічних наук України та Державного комітету України з енергозбереження, знаками «Відмінник освіти України» та «За наукові та освітні досягнення».

Панкевич Ольга Дмитрівна



Кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерних систем у будівництві Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

Автор більше 170 науково-методичних праць, серед яких 1 монографія, 10 навчальних посібників, 27 наукових статей в професійних журналах, 2 публікації у Scopus, 2 патенти на винахід та корисну модель.

Панкевич Володимир Вячеславович



PhD, старший викладач кафедри інженерних систем у будівництві Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

Автор більше 50 науково-методичних праць, серед яких 2 патенти на корисну модель, 10 наукових статей в професійних журналах.

Г. С. Ратушняк, О. Д. Панкевич, В. В. Панкевич

ВИБІР ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З ВРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. С. Ратушняк, О. Д. Панкевич, В. В. Панкевич

**ВИБІР ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ
ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ
З ВРАХУВАННЯМ
БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2026

УДК 69.028:699.86:614.8

P 25

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 21.05.2026 р.)

Рецензенти:

І. Н. Дудар, доктор технічних наук, професор, ВНТУ

К. М. Предун, доктор економічних наук, професор, КНУБА

Ратушняк, Г. С.

P25 Вибір віконних конструкцій житлових будівель з врахуванням безпекової ситуації : монографія [Електронний ресурс] / Г. С. Ратушняк, О. Д. Панкевич, В. В. Панкевич. Електрон. текст. дані. Вінниця: ВНТУ, 2026. (PDF, 142 с.)

ISBN 978-617-8163-94-5 (PDF)

Монографія присвячена питанням розробки і дослідження критеріїв, методів та алгоритмів оптимального вибору надійних віконних систем для житлового фонду в умовах сучасних загроз. Запропоновано комплексний підхід до оцінювання віконних конструкцій, який об'єднує традиційні вимоги із стандартами фізичної безпеки. Розроблено математичні моделі та багатокритеріальні алгоритми прийняття рішень, що дозволяють обґрунтувати вибір віконних конструкцій з врахуванням безпекової ситуації. Розглянуто економіко-математичне обґрунтування інвестицій у безпекові рішення через оцінювання уникнутих збитків та мінімізацію фінансових ризиків. На цій основі сформульовано практичні рекомендації щодо раціонального проектування віконних конструкцій для мінімізації ризиків у надзвичайних ситуаціях і підвищення рівня безпеки мешканців.

Розрахована на фахівців будівельної галузі, науковців інженерно-технічного спрямування, а також магістрів та аспірантів закладів вищої технічної освіти

УДК 69.028:699.86:614.8

DOI: <https://doi.org/10.31649/617.8163.94.5>

ISBN 978-617-8163-94-5 (PDF)

ISBN 978-966-641-987-6 (друк.)

© Г. С. Ратушняк, О. Д. Панкевич, В. В. Панкевич, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
1 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ВИБОРУ ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ.....	9
1.1 Особливості вибору віконних конструкцій при проєктуванні житлових будівель.....	9
1.2 Аналіз параметрів та характеристик, що впливають на вибір раціональних параметрів віконних конструкцій.....	18
1.2.1 Класифікація базових архітектурно-конструктивних та експлуатаційних параметрів віконних конструкцій	18
1.2.2 Безпекові характеристики вибору віконних конструкцій	21
1.3 Сучасні підходи та методи прийняття рішень щодо вибору раціональних віконних конструкцій.....	25
1.4 Математичні методи для розробки моделі вибору віконних конструкцій	28
Висновки до розділу 1	31
2 ФОРМАЛІЗАЦІЯ КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІКОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ	32
2.1 Критеріїв вибору віконних систем.....	32
2.2 Енергоефективність.....	34
2.2.1 Оцінка впливу площі скління на приведений опір теплопередачі зовнішньої стіни.....	34
2.2.2 Формалізація та комплексна оцінка критерію «Енергоефективність».....	40
2.3 Формалізація та оцінка критерію «Архітектурна привабливість та функціональність».....	41
2.4 Формалізація критерію «Ринкова вартість»	47
2.5 Формалізація критерію «Захист від злону».....	49
2.6 Формалізація критерію «Стійкість вікон до вибухової хвилі»	53
Висновки до розділу 2.....	63

3	МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОГО ФАКТОРА	64
3.1	Інтегральний критерій прийняття рішень	64
3.2	Оцінювання частинних критеріїв методом парних порівнянь Сааті	66
3.3	Двоетапний підхід до визначення вагових коефіцієнтів критеріїв	69
3.4	Обґрунтування вагових коефіцієнтів традиційних критеріїв вибору віконних конструкцій за класами об'єктів нерухомості	70
3.5	Математичне моделювання впливу безпекових ризиків на вибір віконних систем	75
3.6	Методика вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекових факторів	82
3.7	Алгоритм вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекових факторів	83
	Висновки до розділу 3	87
4.	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОГО ФАКТОРУ	89
4.1	Варіанти віконних конструкцій та вихідні дані	89
4.2	Оцінювання альтернатив за частинними критеріями	94
4.3	Порівняльний аналіз альтернатив віконних конструкцій	102
4.4	Нормування вагових коефіцієнтів критеріїв	104
4.5	Вибір віконних конструкцій з врахуванням безпекового фактору	107
4.5.	Оцінка чутливості інтегрального критерію до зміни соціально-економічного статусу об'єкта	111
	Висновки до розділу 4	115
5	ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ВІКОННИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ	116
5.1	Методологічна основа ризик-орієнтованого до вибору віконних конструкцій	116

5.2 Модифікація методу вартості життєвого циклу з інтеграції безпекових ризиків	118
5.3 Математична модель коефіцієнта конструктивної вразливості	121
5.4. Методика оцінки інвестиційної доцільності безпекових інженерних рішень	125
5.5 Апробація та аналіз інвестиційної привабливості безпекових рішень віконних конструкцій	127
Висновки до розділу 5	130
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	131

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Скорочення	Повна назва
ДБН	Державні будівельні норми
ДСТУ	Державний стандарт України
НБУ	Національний банк України
ПВХ	Полівінілхлорид
АТ-стандартів	Antiterrorism Standards
МАІ	Метод аналізу ієрархій
P1A – P5A	Класи ударостійкого (антивандального) скла за ДСТУ
RC	Resistance Class (клас стійкості до злому за ДСТУ)
PVB	Polyvinyl Butyral (полівінілбутираль)
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
LCC	Life Cycle Cost (вартість життєвого циклу)
NPV	Net Present Value (чиста приведена вартість)
BIM	Building Information Modeling (інформаційне моделювання будівель)
ISO	International Organization for Standardization (Міжнародна організація зі стандартизації)

ВСТУП

Сучасне проектування житлових будівель відбувається в умовах кардинально змінених викликів. Поряд із традиційними вимогами до енергоефективності, теплового комфорту, звукоізоляції та архітектурної виразності все більшого значення набуває забезпечення безпеки мешканців у разі виникнення надзвичайних ситуацій, зокрема воєнних загроз. Вікна, як один із найменш стійких елементів фасадної оболонки будівлі, відіграють подвійну роль: вони забезпечують природне освітлення, вентиляцію та естетичний вигляд приміщення, водночас стаючи потенційним джерелом небезпеки під час дії вибухової хвилі, уламків або спроб несанкціонованого проникнення.

Військовий стан, в якому проживає Україна, виявив критичну вразливість віконних конструкцій. За даними звітів про руйнування інфраструктури, значна частина поранень і травм серед цивільного населення під час обстрілів спричинена саме розлітанням скляних уламків. Традиційні підходи до вибору вікон, орієнтовані переважно на енергозбереження та вартість, вже не відповідають новим реаліям. Сьогодні проєктувальник змушений одночасно вирішувати конфліктуючі задачі: максимізувати теплоізоляційні властивості, забезпечувати комфорт і естетику, а водночас мінімізувати ризики для життя і здоров'я людей у разі вибухового навантаження або злому.

Незважаючи на наявність низки державних будівельних норм (ДБН) та стандартів (ДСТУ), які регулюють вимоги до віконних конструкцій щодо надійності, теплотехнічних, механічних та протизламних характеристик, у них практично відсутні чіткі рекомендації щодо комплексного врахування безпекової ситуації при виборі раціональних параметрів вікон. Це створює суттєвий розрив між нормативними вимогами та реальними потребами проєктування в умовах мінливої безпекової ситуації – від відносно безпечного тилу до прифронтових територій.

Автори монографії протягом кількох років проводили системні дослідження в цьому напрямі. Науковий колектив накопичив значний досвід у дослідження сфері енергоефективності світлопрозорих конструкцій, оцінки їхньої безпеки та розробки моделей підтримки прийняття рішень. Результати цих досліджень частково опубліковано в наукових статтях і доповідях на міжнародних та всеукраїнських конференціях, а також в дисертаційній роботі Панкевича В. В. (2024).

Мета монографії полягає в теоретичному обґрунтуванні та розробці науково-методичного підходу до підтримки прийняття рішень

щодо вибору раціональних параметрів віконних конструкцій для житлових будівель з обов'язковим урахуванням змінної безпекової ситуації.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- проаналізувати сучасні підходи та математичні методи моделювання вибору віконних конструкцій;
- систематизувати фактори впливу на енергоефективність, протишумну стійкість та вибухостійкість вікон;
- розробити інтегральну модель багатокритеріального вибору віконних конструкцій з адаптивним врахуванням рівня безпекової загрози;
- обґрунтувати рекомендації щодо застосування моделі на різних типах територій (тил, опорні території, прифронтові зони).

Монографія складається з теоретичної та практичної частин. У ній розглянуто нормативно-правову базу, фактори впливу, математичні методи підтримки прийняття рішень (зокрема метод аналізу ієрархій Сатаї), а також запропоновано конкретну інтегральну модель, яка дозволить проєктувальникам обґрунтовано обирати оптимальний варіант віконної конструкції залежно від реальної безпекової ситуації.

Результати дослідження можуть бути корисними для архітекторів, проєктувальників, будівельних компаній, органів державного управління та експертів у сфері цивільного захисту. Запропонований підхід буде сприяти підвищенню стійкості житлового фонду України до сучасних загроз і забезпеченню комплексної безпеки мешканців.

1 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ВИБОРУ ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ

1.1 Особливості вибору віконних конструкцій при проектуванні житлових будівель

Зовнішня оболонка будівлі виконує низку ключових функцій: забезпечує тепло- та звукоізоляцію, формує естетичний вигляд споруди та захищає її від впливу зовнішнього середовища. Невід’ємною складовою цієї оболонки в житлових будівлях є вікна – світлопрозорі конструкції, які надають архітектурну виразність будівлі, створюють візуальний зв’язок із навколишнім середовищем, забезпечують природне освітлення, провітрювання та захист внутрішніх приміщень від атмосферних чинників, вітру, опадів і сонячного випромінювання. Крім того, вікна суттєво впливають на тепло- та звукоізоляційні характеристики огорожувальних конструкцій і визначають параметри роботи інженерних систем опалення й вентиляції, а також впливають на рівень безпеки приміщення.

Важливим завданням при виборі віконних конструкцій (віконних блоків) для житлових будівель є досягнення оптимального балансу між архітектурно-естетичними характеристиками, енергоефективністю, економічною доцільністю та безпекою. Державні стандарти ДСТУ [1 – 11] і будівельні норми ДБН [13 – 15] регламентують основні вимоги до конструктивних, теплотехнічних, звукоізоляційних та експлуатаційних характеристик вікон житлових будівель. Водночас у чинній нормативній базі відсутня комплексна методика вибору раціональної (оптимальної) конструкції вікна, яка б урахувала сукупність визначальних чинників: енергоефективність, функціональність, архітектурно-естетичні параметри, економічність та безпеку.

Конструктивно вікно включає віконний проріз з відкосами, віконний блок, систему ущільнення монтажних швів, підвіконну дошку, елементи відливу та облицювання. Віконний блок є основною функціональною частиною конструкції, яка складається з рами, стулок, імпостів та склопакетів, і визначає функціональні та експлуатаційні властивості вікна (рис. 1.1).

Параметри віконного блоку безпосередньо впливають на рівень тепло- і звукоізоляції, світлопроникності, зручність експлуатації, довговічність та естетичну виразність вікна. Тому у подальшому викладі терміни «вікно» та «віконна конструкція» вживаються у значенні «віконний блок», тобто світлопрозора збірна конструкція, що встановлюється в огорожувальних стінових або покрівельних конструкціях і

призначений для забезпечення природного освітлення, вентиляції та захисту приміщень від атмосферних і шумових впливів. Вікно складається з коробки (рама), стулкових елементів (наприклад, стулочок або імпостів), склопакетів і може включати додаткові компоненти – жалюзі, віконниці тощо.

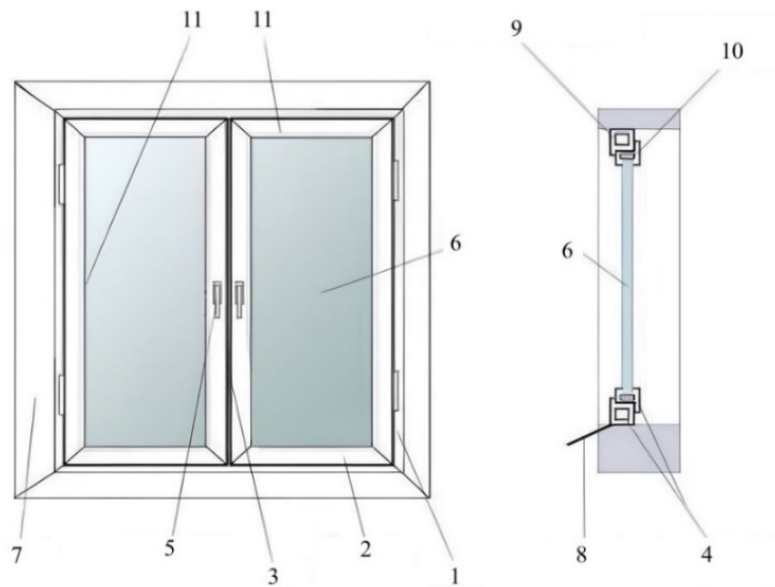


Рисунок 1.1 – Основні елементи вікна: 1 – рама, 2 – стулка, 3- імпост, 4 – армуючий профіль, 5 – фурнітура, 6 – склопакет, 7 – укос, 8 – відлив, 9 – рамний, 10 – створочний профіль, 11 – штапик

Основним геометричним параметром віконної конструкції є її розмір (площа та пропорції), який суттєво впливає на низку ключових експлуатаційних і архітектурних характеристик приміщення та будівлі в цілому:

1. енергоефективність: розміри вікон (площа та пропорції) безпосередньо впливають на теплові втрати через огорожувальну конструкцію та загальні витрати енергії на опалення й кондиціонування повітря, формуючи рівень енергоефективності як окремого приміщення, так і будівлі загалом;
2. природне освітлення: оптимальні розміри та пропорції дозволяють максимально використовувати денне світло, зменшувати потребу в штучному освітленні, створювати сприятливі умови для перебування людини та підвищувати зоровий комфорт внутрішнього середовища;
3. архітектурно-естетичні характеристики – вікна виступають важливим елементом фасадного і інтер'єрного дизайну, визначають об'ємно-просторову композицію будівлі, забезпечують її архітектурну виразність і гармонію;

4. функціональність: правильний вибір розмірів сприяє зручності використання приміщення відповідно до потреби користувачів і підвищує загальну функціональну придатність житлового середовища;
5. вентиляцію та якість мікроклімату: розміри вікон впливають на ефективність природного провітрювання та інтенсивність надходження свіжого повітря, що безпосередньо визначає якість повітряного середовища в приміщенні;
6. безпеку: вікно як елемент огорожувальної конструкції виконує роль бар'єра від зовнішніх атмосферних впливів і потенційних загроз, забезпечуючи необхідний рівень захищеності внутрішніх приміщень

Визначення площі та пропорцій вікон належить до базових проєктних рішень, які приймаються на ранніх етапах проєктування. Такі рішення є складними для коригування на подальших стадіях проєктування, проте саме вони мають визначальний вплив на енергоефективність будівлі, акустичний комфорт (звуко- та шумоізоляцію) та безпеку людей.

Сучасна практика житлового будівництва демонструє стійку тенденцію до застосування великогабаритних світлопрозорих конструкцій – панорамних вікон. Якщо раніше (п'ятнадцять років тому) подібні огорожувальні системи переважно використовувались у житловій нерухомості преміум-класу, то нині вони набули поширення в усіх сегментах ринку житлової нерухомості.

Сьогодні в літературі та проєктній практиці використовується певна класифікація вікон, проте вона носить умовний характер.

Вікна розрізняють за формою та розташуванням [16]: точкові – окремі стандартні вікна; панельні – кілька зблокованих стандартних вікон; стрічкові – протяжні ряди стандартних вікон, що, як правило, розташовуються вздовж фасаду, переважно використовуються у громадських і промислових будівлях. Разом з тим, у чинних будівельних нормах і стандартах (ДСТУ, ДБН) відсутня чітка і загальноприйнята класифікація вікон саме за розмірами (габаритами), що ускладнює уніфікований підхід до їх вибору на стадії проєктування. З огляду на сучасні тенденції широкого застосування великогабаритних світлопрозорих конструкцій у житловому будівництві, зокрема панорамних вікон, доцільно запропонувати уточнену класифікацію для вікон житлових будівель за їх геометричними параметрами (рис. 1.2):

- стандартні вікна (рис. 1.2 А);
- великі вікна – збільшені по висоті або ширині конструкції, але які мають підвіконну частину (рис. 1.2 Б).

- панорамні вікна – конструкції на всю висоту приміщення (рис. 1.2 В).

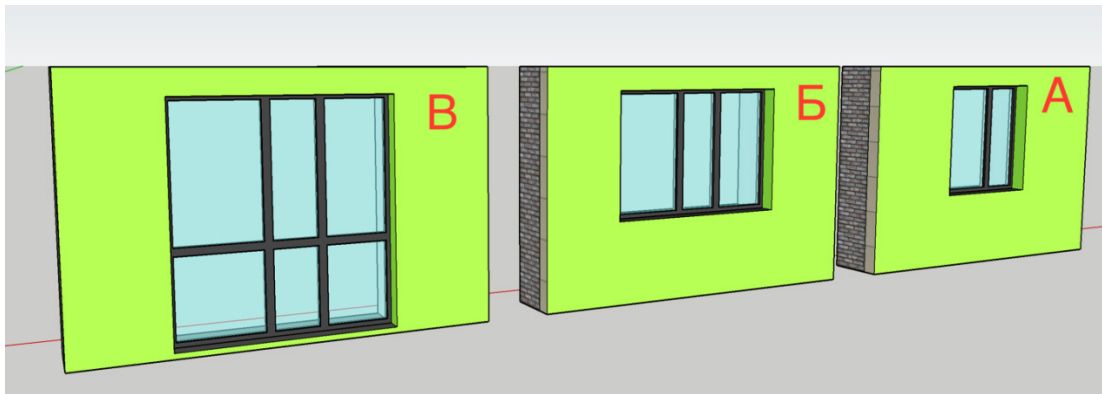


Рисунок 1.2 – Типи вікон у сучасній житловій забудові:
 А – стандарте, Б – збільшене (велике), В – панорамне

У діючих будівельних нормах України (ДБН) термін «панорамне вікно» не визначений і не виділяється як окремий тип конструкції. Водночас у технічній, дизайнерській та маркетинговій практиці цим терміном активно користуються. Панорамне вікно являє собою велику світлопрозору конструкцію від підлоги до стелі, яка займає значну площу фасадної стіни і створює візуальний та просторовий зв'язок із зовнішнім середовищем, забезпечуючи панорамний огляд [17]. На сьогодні в нормативній базі України відсутні спеціальні вимоги до теплотехнічних характеристик, енергоефективності та безпеки панорамних вікон і фасадів житлових будинків з такими конструкціями.

За геометричною формою віконні конструкції у житлових будівлях можуть бути прямокутними, квадратними, арочними, круглими, овальними, трикутними, трапецієподібними, ромбоподібними та багатогранними (зокрема шестикутними) [18]. Найбільш поширеною є прямокутна форма вікон, оскільки вона технологічно проста у виготовленні та зручна в монтажі. Інші форми застосовуються здебільшого з метою підкреслення архітектурного стилю будівлі, реалізації дизайнерських рішень та задоволення специфічних функціональних вимог.

Вікна розрізняють за способом відкривання:

- глухі – не передбачають відкривання;
- розсувні – відкриваються у вертикальній площині;
- відкидні – відкриваються у горизонтальній площині;
- поворотно-відкидні – поєднують обидва варіанти відкривання;
- зсувні – переміщуються в одну сторону (вертикально або горизонтально);
- штапельові – при відкриванні у конструкції відсутній імпост;

- з автоматизованим керуванням – відкривання та закривання здійснюється за допомогою спеціальної фурнітури.

За матеріалом рамних елементів вікна поділяють на: дерев'яні; полівінілхлоридні (ПВХ); з алюмінієвих сплавів; сталеві; склопластикові; комбіновані (деревоалюмінієві, деревополівініл-хлоридні).

У практиці житлового будівництва найчастіше застосовуються віконні конструкції на основі дерев'яних, полівінілхлоридних (ПВХ) та алюмінієвих профілів [17 - 21].

Дерев'яні вікна (рис. 1.3) – традиційний варіант, що відзначається високими тепло- та звукоізоляційними властивостями, природною екологічністю та естетичною привабливістю. До основних переваг дерев'яних рам належать: низька теплопровідність деревини, оптимальне співвідношення міцності та ваги, здатність «дихати» (регулювати вологість), а також висока екологічна безпека матеріалу. Однак вони потребують періодичного обслуговування та захисту від атмосферних впливів.



Рисунок 1.3 – Вікно з дерев'яною рамою в розрізі [21]:

- 1 – скло; 2 – герметизація склопакету, 3 – штапик; 4 – ущільнювач, 6 – профіль; 7 – відлив, 8 – жолоб для провітрювання холодної зони навколо скла, 9 – рамний відлив з розімкнутим тепловим мостом та нижньою вентиляцією, 10 – дерев'яний прижимний прилив; 11 – центральний ущільнювач, 12 – надріз для встановлення зовнішнього підвіконника

Вікна з полівінілхлориду (ПВХ) (рис. 1.4) сучасний і найбільш масовий тип конструкцій. Характеризується високою герметичністю, довговічністю та відносною економічністю та відносною доступністю. До переваг ПВХ-конструкцій належать: висока міцність і зносостійкість, невибагливість в експлуатації, можливість реалізації у різних формах і кольорах, нижча вартість порівняно з дерев'яними та алюмінієвими аналогами.

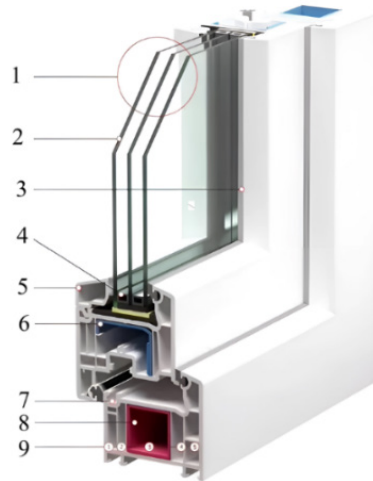


Рисунок 1.4 – Вікно з ПВХ профілем в розрізі [20] :

1 – склопакет ; 2 – скло, 3 – ущільнювач, 4 – пластикова дистанційна рамка;
5 – штапик; 6 – армування створки; 7 – паз штапіка; 8 – замкнене армування;
9 – п'ять повітряних камер.

Алюмінієві вікна (рис. 1.5) відзначаються високою механічною міцністю, стійкістю до корозії, мінімальною деформацією під впливом температурних коливань і тривалим строком експлуатації, що робить їх особливо доцільними для скління великих прорізів і панорамних конструкцій. Сучасні «теплі» алюмінієві профілі з термовставками забезпечують прийнятний рівень енергоефективності, а малі габарити рам дозволяють максимально збільшити площу скління

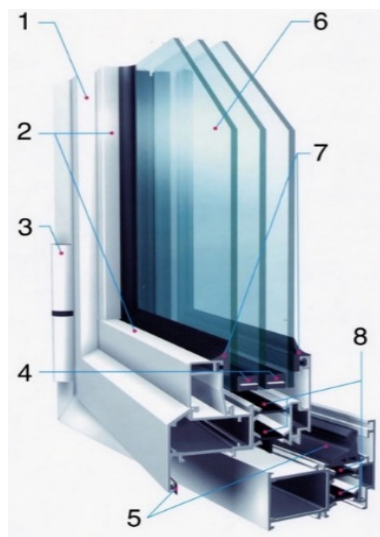


Рисунок 1.5 – Алюмінієве вікно в розрізі [20]:

1 – алюмінієвий сплав з міцним полімерним покриттям; 2 – штапик, 3 – фурнітура, 4 – ізолююча стрічка (підвищує герметичність) 5 – ущільнювальні створки; 6– склопакет; 7 – ущільнювачі склопакету; 8 – термобар'єр

У рамних елементах ПВХ-конструкцій використовуються профілі з різною кількістю камер, що безпосередньо впливає на їх теплоізоляційні характеристики, жорсткість і загальну енергоефективність вікна:

- трикамерний профіль забезпечує базовий рівень теплоізоляції та доцільно застосовувати для помірному клімату або об'єктів з невисокими вимогами до енергоефективності. Він характеризується відносно невеликою шириною та нижчою вартістю;
- п'ятикамерний профіль надає значно кращі показники теплового опору, підвищену жорсткість конструкції та кращу звукоізоляцію. Такі профілі широко застосовуються в сучасному житловому будівництві, забезпечуючи оптимальне співвідношення ціни та енергозберігаючих властивостей;
- шестикамерний профіль та профілі з більшою кількістю камер забезпечують високий рівень теплоізоляції, що дозволяє використовувати в будівлях з підвищеними вимогами до енергоефективності та акустичного комфорту. Зі збільшенням кількості камер зростає ширина профілю, покращуються показники опору теплопередачі, однак збільшується вага конструкції та її вартість.

Важливими конструктивними параметрами ПВХ-профілів є також монтажна глибина та товщина стінок. Віконні ПВХ-профілі поділяють на класи за товщиною стінок (А, В, С) відповідно до європейських стандартів [22, 23]:

- клас А (внутрішні стінки $\geq 2,5$ мм, зовнішні $\geq 2,8$ мм) відзначається підвищеною міцністю, високим рівнем тепло- і звукоізоляції, стійкістю до значних вітрових навантажень.
- клас В (внутрішні стінки ≥ 2 мм, зовнішні $\geq 2,5$ мм) має достатню міцність для житлових будівель, підходить для стандартних або невеликих віконних прорізів; надійність нижча, ніж у класі А.
- клас С (товщина стінок не нормується) застосовується переважно у технічних приміщеннях або як тимчасові системи.

В алюмінієвих віконних конструкціях розрізняють два види профілів - «теплий» та «холодний». Для житлових будівель переважно використовують «теплі» алюмінієві профілі. «Теплий» профіль має термоміст (термовставку) – вставка з полімеру (часто поліамід або армований поліамідом пластик), яка розділяє зовнішню і внутрішню металеві частини профілю. Така конструкція перешкоджає прямому тепловому потоку через високо теплопровідний метал, суттєво зменшує теп-

лові втрати, запобігає утворенню конденсату та підвищує загальну енергоефективність будівлі. «Теплий» алюмінієвий профіль забезпечує високу тепло- та звукоізоляцію, запобігає утворенню конденсату й підвищує енергоефективність будівлі.

Вікна відрізняються за кількістю стулок та за напрямом відкриття [18]. Стулки є основними рухомими елементами вікна. За кількістю стулок розрізняють: одностулкові, двостулкові, тристулкові, чотиристулкові.

Скло покриває 85–90 % площі світлопрозорої конструкції, тому якість скління відіграє ключову роль при виборі вікна. У житлових будівлях застосовують такі варіанти заповнення світлопрозорої частини:

- листовим склом;
- склопакетами;
- поєднанням листового скла і склопакетів.

У новобудовах переважно використовують склопакети, тоді як у житловому фонді, зведеному до 2000 року, ще можна зустріти всі типи скління.

Склопакет – це конструкція з двох, трьох або чотирьох листів скла з'єднаних між собою за допомогою дистанційних алюмінієвих рамок і герметиків (наприклад, бутилу). Між листами скла утворюються повітряні або газонаповнені камери. Одним із ключових елементів склопакета є дистанційна рамка, яка забезпечує фіксовану відстань між склом і захищає внутрішній простір від потрапляння вологи та утворення конденсату. Конструкція склопакета залежить від виду та товщини скла, відстані між листами, типу заповнення камер газом тощо [24]. Приклад базової формули склопакета: 4М1-6-4М1-6-4М1, де «4» – товщина скла в міліметрах, «М1» – скло звичайне, «6» – відстань між листами скла в міліметрах. Товщина склопакетів може становити: 24 мм, 32 мм, 36 мм, 42 мм тощо. Вибір конкретного склопакета визначається вимогами замовника, технічними можливостями профільної системи та технологічними обмеженнями виробництва. Тип скла залежить від технології його обробки та нанесених покриттів. Скло, що застосовується у вікнах житлових будівель, характеризується різними експлуатаційними властивостями: теплотехнічними (теплопровідність, опір теплопередачі), міцнісними (стійкість до механічних навантажень, ударів, вітрового тиску) та оптичними (світлопропускання, відбивна здатність, захист від ультрафіолетового випромінювання). Вид скла зазвичай позначається в маркуванні або у формулі склопакета. Основні характеристики скла, що використовується у вікнах житлових будівель та особливості їх використання наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні типи скла у віконних конструкціях та їх характеристики [24 – 29, 31]

Тип скла	Основні характеристики	Особливості використання
М (стандартне листове скло)	Стандартна прозорість, низький опір теплопередачі, середня міцність	Базовий варіант для недорогих конструкцій
F (флоат-скло)	Висока якість поверхні, відмінна прозорість і рівність	Найпоширеніший тип у сучасних вікнах
A (армоване)	Містить металеву сітку, підвищена механічна міцність і безпека при руйнуванні	Підвищена безпека, сходові клітки, технічні приміщення
К-скло (енергозберігаюче)	Тверде низькоемісійне покриття (коефіцієнт емісії $\sim 0,2$), знижує теплові втрати	Енергоефективні вікна в помірному кліматі
I-скло (енергозберігаюче)	М'яке низькоемісійне покриття (коефіцієнт емісії $\sim 0,04$), високий рівень теплоізоляції	Будівлі з високими вимогами до енерго-ефективності, сучасні склопакети класу A+
S (масово забарвлене)	Забарвлене в масі скла, знижує яскравість світла та сонячне теплове навантаження	Південні та західні фасадні сторони, декоративний ефект, підвищення конфіденційності
Тоноване	Пігментоване або з тонуючою плівкою, знижує проникнення сонячного тепла та яскравість	Підвищення конфіденційності та сонцезахист приміщень
Ламіноване (триплекс)	Багатошарове скло з PVB-плівкою, високі звукоізоляційні властивості, безпека при руйнуванні	Підвищена безпека, шумозахист, дитячі кімнати, нижні поверхи
Загартоване	Механічно зміцнене, витримує температурні перепади, ударостійке	Великогабаритні вікна, балконні двері, фасадне скління
PI /Low-E з тепловідбивною плівкою	Мультифункціональне поєднує енергозбереження та сонцезахист.	Сучасні енергоефективні вікна преміум-клас

1.2 Аналіз параметрів та характеристик, що впливають на вибір раціональних параметрів віконних конструкцій

Параметри віконних конструкцій впливають на їх базові характеристики, які є основою для забезпечення раціональної функціональності, енергоефективності, безпеки та естетики приміщення. Згідно з чинними нормативними документами [2 – 4, 6, 9, 14, 15, 25] до основних регламентованих характеристик вікон належать:

- приведений опір теплопередачі;
- звуко- та шумоізоляція;
- рівень природного освітлення та коефіцієнт загального світлопропускання;
- паро-, повітро- та водонепроникність;
- стійкість до силових навантажень від вітру та злому.

Властивості вікна залежать від його конфігурації та характеристик, наприклад зміна матеріалу та кількості камер віконної рами впливає на теплотехнічні і акустичні характеристики, масу конструкції та її вартість. Характеристики матеріалу рами впливають на довговічність, жорсткість, стійкість до деформацій та безпекові показники всієї віконної системи.

Вибір параметрів вікна здійснюється ще на етапі проектування, тому важливо визначити фактори, що впливають на прийняття рішення щодо конструкції вікна.

1.2.1 Класифікація базових архітектурно-конструктивних та експлуатаційних параметрів віконних конструкцій

Відповідно до будівельних норми та стандартів [1 – 9, 12, 24, 25] та науково-технічної літератури [16 – 19, 30, 31, 33] параметри віконних конструкцій доцільно класифікувати за такими основними параметрами: геометричні, конструктивні, функціонально-експлуатаційні (в тому числі енергетичні) та економічні.

Геометричні параметри віконних конструкцій характеризують форму, розміри та пропорції віконного прорізу і самої конструкції. Вони належать до базових проектних характеристик, оскільки значною мірою визначають архітектурний вигляд будівлі, рівень природного освітлення, енергоефективність та функціональні можливості приміщення. До основних геометричних параметрів належать [12 – 17]:

- розміри віконного блока (висота та ширина) впливають на рівень природного освітлення приміщень і загальну енергоефективність будівлі, формують естетичний образ будівлі;

- кількість і конфігурація стулок (глухі, рухомі);
- площа світлопрозорого заповнення та співвідношення площі скління до загальної площі фасадної стіни. Збільшення площі скління призводить до зростання теплових втрат у холодний період року, що вимагає компенсації за рахунок застосування енергоефективних склопакетів і потребує ретельного теплотехнічного розрахунку.

Геометричні параметри є визначальними на ранніх стадіях проектування, оскільки їх зміна на подальших етапах життєвого циклу пов'язана зі значними технічними та економічними труднощами.

Конструктивні параметри визначають матеріальне виконання, технологічну будову та експлуатаційну надійність віконної конструкції в цілому. Вони безпосередньо впливають на довговічність, механічну міцність, тепло- і звукоізоляційні характеристики вікна, а також на його вартість і особливості технології монтажу [2, 3, 18, 21 – 24, 26].

До основних конструктивних параметрів належать:

- тип профілю (полівінілхлоридний (ПВХ), алюмінієвий, дерев'яний або комбінований) – визначає теплоізоляційні властивості, механічну міцність і довговічність конструкції;
- тип профільної системи («теплий» або «холодний») має вирішальне значення для алюмінієвих конструкцій;
- монтажна глибина (ширина) профілю, товщина стінок і кількість повітряних камер у ньому – безпосередньо впливають на тепловий опір конструкції;
- конструкція склопакета (товщина та кількість камер – однокамерний, двокамерний тощо) та вид скла (звичайне, загартоване, ламіноване (триплекс), енергозберігаюче І-скло, К-скло тощо) – визначає не тільки світлопропускну здатність, але й енергетичні, захисні та акустичні характеристики вікна;
- спосіб відкривання стулок (поворотний, відкидний, поворотно-відкидний, розсувний, зсувний, штупльовий тощо) та тип фурнітури – впливають на функціональність, зручність експлуатації та герметичність вікна;
- тип ущільнювачів – забезпечує герметичність притворів;
- спосіб з'єднання рамних елементів (зварювання, механічне кріплення);
- елементи кріплення вікна у прорізі (анкери, монтажні пластини, монтажна піна, паро- та гідроізоляційні стрічки) – забезпечують стійкість до вітрових навантажень і довговічність монтажних швів.

Конструктивні параметри тісно взаємопов'язані з геометричними та функціонально-експлуатаційними характеристиками та є визначальними при забезпеченні комплексної надійності та енергоефективності віконних конструкцій.

Функціонально – експлуатаційні параметри визначають здатність віконної конструкції забезпечувати комфортні мікрокліматичні умови в приміщенні, її енергоефективність та експлуатаційні властивості протягом усього терміну служби Ці параметри є інтегральними, оскільки залежать від поєднання геометричних і конструктивних характеристик вікна.

До основних функціонально-експлуатаційних параметрів належать [2 – 4, 12, 14, 15, 17, 24, 32]:

- теплоізоляційні характеристики (результуючий коефіцієнт теплопередачі, опір теплопередачі вікна, клас енергоефективності вікон) – суттєво впливають на загальні тепловтрати будівлі та рівень її енергоефективності, сприяючи суттєвому зниженню енергоспоживання будівлі на опалення та кондиціонування;
- звукоізоляція (індекс ізоляції повітряного шуму) – вищі значення цього показника забезпечують комфортне акустичне середовище в приміщенні, зменшуючи вплив зовнішнього шуму;
- світлопроникність і сонцезахисні властивості скла – визначають рівень природного освітлення та ступінь захисту приміщення від надмірного сонячного випромінювання;
- герметичність щодо повітря та води (повітропроникність і водонепроникність) запобігає неконтрольованим тепловтратам, протягом та проникненню вологи;
- вентиляційна здатність (можливість природного провітрювання, режими мікропровітрювання) – забезпечує необхідний повітрообмін без значних тепловтрат;
- захист від утворення конденсату та промерзання – досягається завдяки правильному вибору «теплих» профілів, енергозберігаючого скла та якісної «теплої» дистанційної рамки у склопакеті;
- теплотехнічними характеристиками матеріалу профілю та склопакета (коефіцієнт теплопередачі, опір теплопередачі). Теплоізоляційні характеристики вікон суттєво впливають на загальні тепловтрати будівлі та рівень її енергоефективності, дозволяє суттєво дозволяють знизити енергоспоживання будівлі на опалення та кондиціонування.

Функціонально-експлуатаційні параметри є результируючими характеристиками вікна і безпосередньо впливають на комфорт проживання, енерговитрати та довговічність усієї огорожувальної конструкції. Таке поділення зручне при проектуванні та технічному аналізі віконних систем:

- геометричні параметри впливають на архітектурні пропорції та інсоляцію;
- конструктивні – на довговічність, ремонтпридатність і фізичну стійкість;
- функціонально-експлуатаційні параметри впливають на енергоефективність та кліматичний комфорт.

Вартість віконної конструкції також є впливовим критерієм під час вибору вікон, особливо у будівлях бюджетного сегменту, де оптимальне поєднання вартості та енергозбереження має ключове значення.

1.2.2 Безпекові характеристики вибору віконних конструкцій

Безпека віконних конструкцій є одним із ключових критеріїв для мешканців будівлі і розглядається при виборі вікон проєктувальниками найчастіше з точок зору [9, 25, 34, 39]:

– захисту приміщення від проникнення: оскільки вікна є елементом зовнішньої огорожувальної конструкції, вони повинні забезпечувати надійний бар'єр для сторонніх осіб. Це досягається застосуванням протизламних профілів, спеціальної фурнітури, замків і багатошарового або ламінованого скла, що підвищує стійкість до механічного впливу та забезпечує безпеку майна;

– безпечної експлуатації віконних конструкцій для користувачів: це включає використання спеціальних засобів блокування або обмежень руху віконних стулок та захисної фурнітури, що запобігає травмам. У житлових будівлях це особливо важливо для захисту дітей від випадіння з вікон, а також для безпечного використання автоматичних або дистанційно керованих стулок. Додатково враховується захист від защемлення та міцність елементів під час повсякденної експлуатації.

В умовах повномасштабної військової агресії та погіршення воєнно-безпекової ситуації в Україні, проблема забезпечення захисту внутрішнього середовища будівель набула критичної актуальності [34, 39]. Вплив надлишкового тиску у фронті вибухової (ударної) хвилі спричиняє крихке руйнування світлопрозорих елементів віконних конструкцій. Цей процес супроводжується утворенням високошвидкісних гострих уламків, які становлять пряму загрозу життю та здоров'ю людей [27, 36, 39]. За даними аналізу наслідків руйнувань у щільній міській забудові, до 70 % травматичних уражень під час вибухів спричинені

дією вторинних уражаючих факторів, серед яких домінуючим є фрагментоване скло [27].

Згідно зі статистичними даними звіту [35] станом на початок 2024 року загальна кількість зруйнованих або пошкоджених внаслідок бойових дій об'єктів житлового фонду становить понад 250 тисяч будівель (що складає майже 10% від усього житлового фонду країни). Забезпечення належного безпекового рівня накладає додаткові вимоги на проектування житлових будівель, зокрема зовнішніх огорожувальних конструкцій, з урахуванням потенційних ризиків та загроз для життя та здоров'я людей. Наприклад, у новобудовах із бомбосховищами ці аспекти вже починають регулюватися будівельними нормами.

Світлопрозорі елементи віконних конструкцій є найбільш вразливою ланкою фасадних систем будівлі під дією надлишкового тиску фронту вибухової (ударної) хвилі. Цей фактор зумовлює необхідність введення додаткового критерію при проектуванні та виборі вікон – забезпечення стійкості конструкції до дії вибухової хвилі (імпульсних динамічних навантажень).

На сьогодні розроблено комплекс інженерно-технічних рекомендацій щодо мінімізації наслідків руйнування вікон при вибухах, які, проте, ще не повною мірою імplementовані в обов'язкові державні будівельні норми для цивільного сектору [36]. До превентивних та конструктивних заходів підвищення безпеки належать [20, 25, 27, 34, 36, 39]:

- модифікація характеру фрагментації скла шляхом його армування клейкими стрічками або цупкими тканинами (як тимчасовий захід), що локалізує зону розтріскування та перешкоджає розльоту дрібних високошвидкісних осколків;
- нанесення полімерних антиосколкових (удароміцних) плівок («броньованими», «тривким склом», anti-shatter film) на внутрішню поверхню скління. Завдяки високій адгезії та міцності на розрив, такі плівки поглинають частину енергії вибуху та утримують фрагменти зруйнованого скла в єдиній площині;
- застосування багатошарового ламінованого скла (триплексу) з використанням еластичних полімерних прошарків (наприклад, полівінілбутиралу – PVB). Під дією вибухового імпульсу таке скло здатне до значних пружно-пластичних деформацій без утворення вільних уламків, що суттєво знижує ризик летальних травм;
- інтеграція зовнішніх захисних систем (посилених ролет, металевих жалюзі, решіток), які виконують функцію первинного екрана, знижуючи пікове аеродинамічне навантаження на світлопрозору частину;

- посилення вузлів анкерування та жорсткості профільної системи. Згідно з принципом рівномірності конструкцій (*balanced design*), несуча здатність віконної рами, монтажних швів та вузлів кріплення до стіни повинна перевищувати межу руйнування склопакета. Це критично важливо для запобігання відриву та «вильоту» цілого віконного блока всередину приміщення як єдиного масивного вторинного снаряда.

В Україні сьогодні не існує будівельних норм, що безпосередньо регламентують підбір віконних конструкцій житлових будівель з урахуванням вторинних факторів вибуху (наприклад, ударної хвилі, осколків скла, зміщення повітря). Однак окремі нормативні документи та стандарти містять вимоги, що можуть бути застосовані при проектуванні: зокрема, ДСТУ [10, 11], які класифікують стійкість вікон до вибуху, та ДСТУ [25] щодо захисного скління. Ці норми встановлюють загальні вимоги безпеки до конструкцій, що можуть бути піддані впливу вибухових хвиль, та містять рекомендації щодо їх стійкості, тому можуть бути корисними при оцінці ризиків та виборі відповідних віконних конструкцій.

Актуальність питання безпечного вибору вікон підтверджується даними ринку нерухомості [41] та виробників вікон [38]: покупці квартир у новобудовах все частіше звертають увагу на близькість об'єктів критичної інфраструктури, аеропортів, залізниць та інших об'єктів, які потенційно можуть стати цілями ворога. Крім того, у регіонах східної, центральної та південної України спостерігається зниження попиту на квартири з великими або панорамними вікнами [41], що також пов'язано з факторами безпеки та ризиком вторинних наслідків при надзвичайних ситуаціях.

Під час вибору детальних характеристик вікон з урахуванням безпекових аспектів [34] особливо важливими є:

- характеристики профілю – товщина, ширина, матеріал (ПВХ, алюміній, дерево, комбіновані матеріали), що визначають міцність, теплоізоляцію та стійкість до механічних впливів;
- кількість повітряних камер у профілі – впливає на тепло- та звукоізоляційні властивості конструкції;
- кількість склопакетів та їх характеристики – товщина скла, тип скла (ламіноване, енергозберігаюче, тоноване), наявність газових заповнень у камерах, що визначає енергоефективність та безпеку;
- тип і якість ущільнювачів – забезпечують герметичність, зменшують тепловтрати та підвищують стійкість до пилу, вологи та шуму;

- якість і тип фурнітури – механізми відкривання, блокування стулок, обмежувачі руху, що впливають на функціональність та безпеку користувачів;
- безпекові елементи – наявність протизламних елементів, броньованих плівок або ламінованого скла для підвищення захищеності від вторинних факторів вибуху та травматизму;
- монтажні характеристики – правильне кріплення вікна, герметизація і додаткові анкери, що підвищують надійність конструкції під час екстремальних навантажень.

Комплексний вибір раціональної конструкції вікна базується на системі взаємопов'язаних критеріїв, серед яких можна виділити [42,43]:

- енергетичні та теплотехнічні критерії, які направлені на забезпечення нормативного рівня теплоізоляції для мінімізації тепловтрат та підвищення загальної енергоефективності будівлі;
- архітектурно-естетичні критерії, які забезпечують інтеграцію конструкції у фасад будівлі, відповідність її форми, пропорцій та кольорового рішення заданому архітектурному стилю;
- функціонально-ергономічні критерії, які направлені на забезпечення нормативної інсоляції (доступу природного світла), ефективного повітрообміну (провітрювання) та зручних режимів експлуатації стулок;
- економічні критерії, які направлені на досягнення раціонального балансу показників «ціна-якість» з урахуванням початкової вартості віконної системи та витрат на її подальшу експлуатацію;
- критерії фізичної безпеки та протизламності, які забезпечують формування надійного зовнішнього бар'єра проти несанкціонованого проникнення з метою захисту майна;
- воєнно-безпекові критерії (стійкість до надзвичайних ситуацій), що визначають здатність конструкції протистояти вторинним факторам вибуху та мінімізувати ризик травмування уламками за рахунок застосування безпечного скла (триплексу, плівок), посилених профілів та захисних елементів.

Під час прийняття рішень щодо вибору віконної конструкції ці фактори можуть мати різні пріоритети залежно від вимог замовника, умов експлуатації та регіональних особливостей.

1.3 Сучасні підходи та методи прийняття рішень щодо вибору раціональних віконних конструкцій

Вибір раціональних параметрів і характеристик віконних конструкцій (геометричні розміри, матеріали профілю, кількість камер, властивості склопакетів) потребує системного та обґрунтованого підходу, оскільки ці параметри безпосередньо впливають на енергоефективність будівлі, її зовнішній вигляд та рівень енергоспоживання. При цьому вибір має здійснюватися з урахуванням нормативних вимог [1–15], які регламентують теплотехнічні, міцнісні, експлуатаційні та безпекові характеристики віконних систем. Актуальність проблеми підкреслюється у вітчизняних і зарубіжних дослідженнях у сфері архітектури, будівництва та енергозбереження.

Ряд досліджень присвячено аналізу окремих факторів, що впливають на ефективність віконних конструкцій. Зокрема, у роботі [31] досліджено вплив низькоемісійних покриттів на теплопередачу склопакетів. Дослідження [44] присвячене вибору «smart windows» (розумних вікон), які дозволяють динамічно контролювати пропускання сонячної радіації залежно від кліматичних умов. Проте зазначені роботи не охоплюють комплексного підходу до моделювання вибору віконних систем, що потребує врахування сукупності критеріїв та методів оптимізації. Як приклад інструментів первинної оцінки проєктних рішень за показниками енергозбереження може використовуватися онлайн-калькулятор енергоефективності вікон [43], який дозволяє виконати спрощене порівняння альтернатив.

Під час проєктування часто виникають суперечності, наприклад, між оптимізацією низького споживання енергії (що вимагає зменшення площі застління) та забезпеченням візуального комфорту (що потребує її збільшення) [45]. Аналогічні компроміси між енергоефективністю, комфортом та іншими критеріями підтверджено у сучасних дослідженнях багатокритеріальної оптимізації [47, 50 – 51, 60]. Для їх вирішення застосовуються комбіновані критерії та визначення допустимих меж простору рішень.

У роботах [17, 30, 37, 42] проаналізовано сукупність факторів, що впливають на енергоефективність світлопрозорих огорожувальних конструкцій, та проведено системну оцінку їхнього впливу на тепловий режим сучасних будівель. Крім того, у роботах [42, 46] вибір оптимальних конструкцій вікон також розглядається за організаційно-технологічними чинниками. У роботі [46] наведено багатокритеріальний

аналіз вибору рішень світлопрозорих конструкцій за критеріями: складність виготовлення; маса конструкції; вартість конструкції; вартість виконання робіт; зручність монтажу; трудомісткість монтажу.

Класичні підходи до вибору віконних систем, що базувалися переважно на теплотехнічних та економічних показниках, потребують суттєвого перегляду в умовах сучасних викликів, зокрема погіршення воєнно-безпекової ситуації. Останні дослідження підкреслюють необхідність врахування стійкості світлопрозорих конструкцій до дії надлишкового тиску вибухової хвилі [34, 48 – 49, 63].

Питання стійкості віконних конструкцій до впливу вибухової хвилі та запобігання травмам від уламків розглядається у вузькоспеціалізованих дослідженнях [27, 52 – 53, 57, 58, 66, 67] та нормативних документах і стандартах [10 – 11, 55 – 56, 62]. У роботі [53] комплексно проаналізовано сучасні методи проектування вибухостійких фасадів із використанням експериментальних та чисельних підходів, інженерних методів оцінки конструкцій, що відображає загальноєвропейський тренд переходу від простих емпіричних допусків до складних інженерних моделей, які розглядають вікно як цілісну систему.

Роботи [52, 57, 73 – 74] присвячені дослідженням динамічної реакції ламінованого скла під дією вибухового навантаження. Визначено, що траєкторію та дальність розкидання уламків скла важко точно передбачити через складність процесів руйнування. Експериментальні дослідження [57] показують залежність енергоємності ламінованого скла від швидкості навантаження, що є важливим при оцінці його захисних властивостей.

У роботі [52] визначено, що руйнування багатошарового загартованого скла відбувається в трьох основних режимах (рис. 1.6):

- легкі пошкодження – дрібні тріщини без осколків (рис. 1.6 а);
- помірні пошкодження – радіальні наскрізні тріщини з прилипанням осколків до PVB-прошарку (рис. 1.6 б);
- небезпечні ушкодження – тріщини радіальні, поздовжні та горизонтальні наскрізні з вилітанням осколків у приміщення без обмежень (рис. 1.6 с).

Для детального вивчення закономірностей виникнення та поширення тріщин у віконних конструкціях у роботах [72 – 73] теорію руйнування інтегровано в чисельні моделі, що дозволяє враховувати конструктивні та матеріальні параметри при прийнятті рішень.

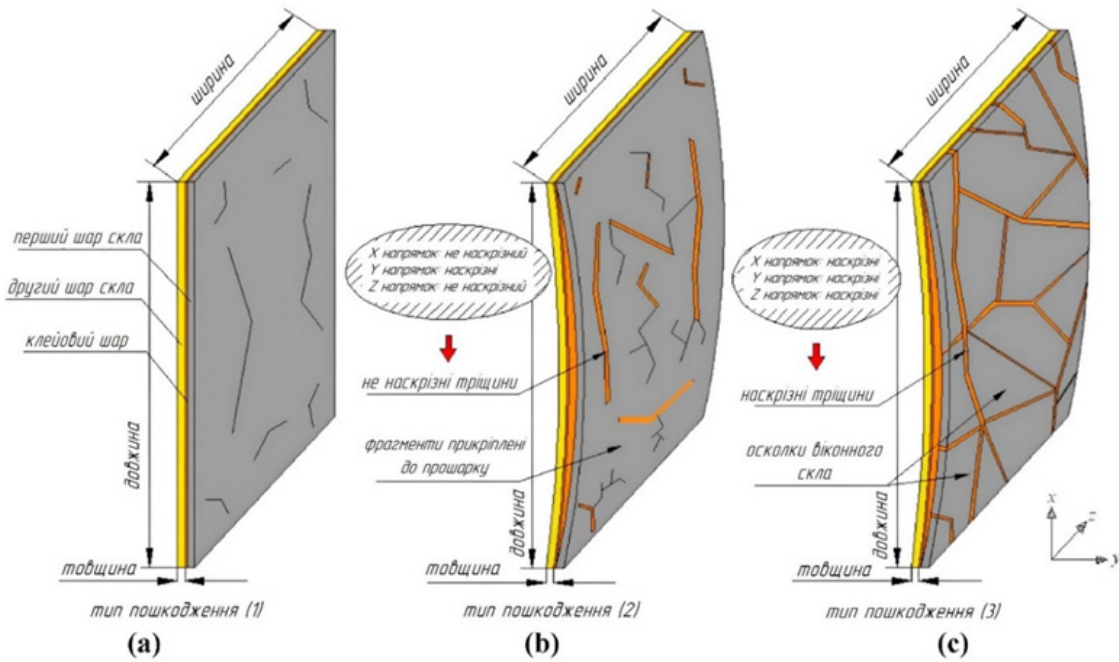


Рисунок 1.6 – Режим руйнування багатошарового загартованого скла [52]:
 а – легкі пошкодження; б – помірне пошкодження;
 с – небезпечне руйнування

Вибухове навантаження має стохастичний характер, тому у наукових дослідженнях застосовуються ймовірнісні методи оцінки ризиків. Зокрема, у роботі [70] використано підхід ймовірнісної оцінки ризиків та кривих вразливості (fragility curves) для визначення ймовірності пошкодження скління залежно від параметрів вибуху.

Дослідження [74] підкреслює необхідність врахування фактичного технічного стану вікон при оцінці їхньої стійкості, оскільки експлуатаційні умови суттєво впливають на результати моделювання. Інформаційний бюлетень [27], підготовлений Департаментом безпеки та охорони ООН та практичні матеріали [64] містять детальний аналіз ризиків, пов'язаних із уламками скла під час вибухів, та пропонують стандарти й заходи для підвищення безпеки віконних систем. Зазначені матеріали доцільно використовувати для визначення ключових факторів, які необхідно враховувати при оцінці стійкості вікон. Узагальнення сучасних підходів до оцінки вразливості фасадів наведено у роботі [65], де систематизовано експериментальні та чисельні методи аналізу ризиків.

Таким чином, сучасна парадигма вибору раціональних віконних конструкцій трансформується від однофакторного аналізу до комплексного системного моделювання. Тема проектування вікон з урахуванням їх стійкості до вибухової хвилі є вкрай актуальною та створює необхідність розробки єдиного підходу, що поєднує енергетичні, функці-

ональні та безпекові критерії. Існуючі дослідження дозволяють визначити слабкі місця вікон під час ударних навантажень та сформуванати систему критеріїв оцінки їхньої безпеки та є передумовою розробки інтегрованого підходу для вибору віконних конструкцій.

1.4 Математичні методи для розробки моделі вибору віконних конструкцій

Прийняття рішень щодо вибору раціональних параметрів віконних конструкцій базується на знаннях про об'єкт, процеси, що в ньому відбуваються або можуть відбутися, а також на множині показників, які характеризують ефективність і якість рішення. Специфіка такого прийняття рішень полягає в тому, що для більшості варіантів неможливо точно розрахувати всі наслідки, а лише оцінити їх імовірний вплив на кінцевий результат.

Сучасні підходи до моделювання вибору раціональних параметрів віконних конструкцій базуються на інтеграції методів багатокритеріального аналізу, багатоцільової оптимізації та теорії нечітких множин [54, 68, 76]. Вони дозволяють комплексно враховувати енергетичну ефективність, тепловий і візуальний комфорт, безпеку (зокрема вибухостійкість), економічні та екологічні критерії. Аналіз математичних методів включає різні підходи до оптимізації та багатокритеріального оцінювання варіантів конструкції вікон.

Методи оптимізації застосовуються для пошуку значень параметрів, що забезпечують максимізацію бажаних характеристик (енергоефективність, звукоізоляція, безпека) та мінімізацію небажаних (вартість, тепловтрати) [50, 51, 59]. До них належать градієнтні методи, еволюційні методи та генетичні алгоритми, що імітують процес природного відбору для пошуку глобального оптимуму у складних системах з великою кількістю параметрів.

Методи аналізу чутливості, які дають змогу оцінити вплив окремих параметрів (товщина профілю, кількість камер, тип склопакета) на ключові характеристики конструкції. Це дозволяє ідентифікувати найбільш значущі параметри та зосередити оптимізацію саме на них.

Методи аналізу даних (регресійне моделювання, метод головних компонент, машинне навчання) використовуються для прогнозування характеристик на основі експериментальних або статистичних даних.

Моделювання експертних знань передбачає використання аналітичних і експертних систем для врахування суб'єктивних факторів та нестабільності параметрів. Цей підхід дозволяє поєднати кількісні розрахунки з якісними оцінками фахівців [76].

Вирішення задачі вибору оптимальної конструкції вікон в умовах конфлікуючих критеріїв (мінімізація тепловтрат, максимізація безпеки, забезпечення функціональності, обмеження бюджету) потребує залучення сучасного математичного апарату. Багатокритеріальний аналіз забезпечує одночасне врахування кількох критеріїв і пошук компромісного рішення [47, 59, 68]. Ці методи дозволяють здійснювати формалізований пошук компромісного рішення одного із варіантів віконної конструкції.

Оскільки значна частина експлуатаційних показників (естетичність, архітектурна гармонія, суб'єктивний комфорт) має складно формалізований характер і пов'язана із невизначеністю, перспективним напрямом є використання методів штучного інтелекту, зокрема теорії нечітких множин та інтелектуальних систем прийняття рішень [54, 76]. Це дозволяє формалізувати лінгвістичні оцінки («висока енергоефективність», «помірна вартість», «достатній рівень безпеки») у вигляді кількісних параметрів. для подальшого оброблення та знаходження оптимального компромісу.

Серед методів багатокритеріального аналізу, що можуть бути застосовані для вибору параметрів віконних конструкцій, виділяють такі:

Метод аналізу корисності базується на побудові функції корисності для кожного критерію та подальшому обчисленні інтегральної (загальної) корисності для кожної альтернативи. Він дає змогу кількісно оцінити переваги різних варіантів на основі суб'єктивних уподобань особи, що приймає рішення. Його обмеженням є складність формування функцій корисності та залежність від суб'єктивних уподобань.

Метод ELECTRE, що використовує відношення переваги між альтернативами з урахуванням порогів чутливості. Його суть полягає у побудові відношень переваги між альтернативами з урахуванням порогів чутливості. Ефективний при великій кількості критеріїв, але складний у реалізації та інтерпретації.

Метод TOPSIS орієнтований на вибір альтернативи, яка має найменшу відстань до позитивного ідеального рішення та найбільшу - до негативного. Метод зручний для практичного використання завдяки зрозумілій логіці розрахунків, але його недоліком є висока чутливість до вибраного способу нормалізації даних та можливе спотворення результатів при нелінійному характері залежностей між критеріями.

Метод евклідового ранжування [69], що використовує відношення переваги між альтернативами з урахуванням порогів чутливості. Ефективний при великій кількості критеріїв, але складний у реалізації та інтерпретації.

Метод аналізу ієрархій (MAI), розроблений Т. Сааті [68], який дозволяє представити задачу у вигляді ієрархії «мета – критерії – альтернативи» та визначити пріоритети шляхом парних порівнянь. Основна ідея полягає в тому, що кожен елемент порівнюється з іншими елементами попарно, отримуючи числові оцінки або ранги відповідно до їхньої відносної важливості.

Аналіз наведених математичних підходів демонструє, що для розв'язання задачі багатокритеріального вибору віконних конструкцій з урахуванням енергоефективності, економічності, архітектурних і функціональних характеристик а також безпекових чинників, найбільш доцільним є метод аналізу ієрархій (MAI) [68, 77]. Основними перевагами методу аналізу ієрархій Сааті є:

- можливість структурування складної проблеми у вигляді логічної ієрархії;
- урахування як кількісних, так і якісних факторів, що особливо важливо при оцінюванні архітектурно-конструктивних рішень;
- залучення експертних оцінок для визначення відносної вагомості критеріїв у випадках, коли точні числові дані відсутні або є неповними;
- прозорість та інтерпретованість результатів, що дає змогу пояснити обґрунтованість вибору;
- можливість інтеграції з іншими методами (наприклад, нечіткими множинами або оптимізаційними моделями) для підвищення точності оцінки в умовах невизначеності.

Застосування методу парних порівнянь для розробки моделі прийняття рішення щодо вибору раціонального варіанту віконної конструкції житлових будівель включає такі основні етапи:

1. **Формування множини альтернатив** – визначення варіантів віконних конструкцій (з різними параметрами), які необхідно порівняти між собою.
2. **Визначення критеріїв оцінювання** – енергоефективність, вартість, дизайн, безпека тощо, які впливають на вибір.
3. **Побудова матриць парних порівнянь** – оцінювання відносної важливості критеріїв та альтернатив за шкалою Сааті.
4. **Обчислення вагових коефіцієнтів** – визначення пріоритетів, що відображають загальну важливість кожного критерію та альтернативи.
5. **Розрахунок інтегрального показника** кожної альтернативи з урахуванням вагових коефіцієнтів критеріїв.

6. **Прийняття рішення.** На основі отриманих інтегральних показників здійснюється вибір найбільш раціональної альтернативи віконної конструкції.

Таким чином, вибір віконної конструкції доцільно розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації, у якій альтернатива інтерпретується як конкретний варіант конструктивного рішення. Застосування сучасних математичних методів дозволяє підвищити обґрунтованість прийнятих рішень та адаптувати їх до умов невизначеності та підвищених безпекових вимог.

Висновки до розділу 1

Аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень свідчить, що питання вибору раціональних параметрів і конструкцій віконних систем є багатограним і охоплює енергозбереження, комфорт, естетику, вартість і безпеку. Більшість наукових праць присвячено підвищенню енергоефективності світлопрозорих елементів огорожувальних конструкцій, оптимізації теплотехнічних і світлотехнічних характеристик, а також використанню новітніх матеріалів і технологій, таких як «розумні вікна» або ламіноване скло. Разом з тим, проведений аналіз показав, що у наявних наукових працях недостатньо уваги приділено моделюванню процесу прийняття рішень при виборі вікон з урахуванням безпекових факторів. В існуючих роботах основна увага зосереджена на енергетичній ефективності, теплотехнічних показниках або конструктивній надійності, тоді як питання вибору віконних конструкцій за критерієм безпеки населення залишаються слабо формалізованими.

При прийнятті рішень щодо раціонального варіанту віконних конструкцій методологічно пропонується розглядати не задачу оптимізації параметрів вікна, а задачу вибору віконних конструкцій із певної кількості доцільних варіантів. Вибір віконної конструкції при проектуванні будівлі можна розділити на два етапи:

1. Формування множини альтернатив – за розмірами, параметрами та конструктивними, технічними, функціональними характеристиками.
2. Знаходження раціонального варіанту із альтернатив з врахуванням низки критеріїв: типу будинку, його розташування, необхідної енергоефективності, ціни, безпекової ситуації тощо.

Для системного аналізу таких багатофакторних задач доцільним є застосування методу аналізу ієрархій Сааті (MAI), який дозволяє поєднати кількісні та якісні критерії, врахувати експертні оцінки й забезпечити узгодженість рішень стосовно раціонального варіанту конструкції вікон..

2 ФОРМАЛІЗАЦІЯ КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІКОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ

2.1 Критеріїв вибору віконних систем

Задача вибору віконних конструкцій є важливою складовою фундаментальних рішень на етапі проектування будівлі. Прийняте рішення щодо типу та параметрів віконної конструкції суттєво впливає на енергоефективність об'єкта, функціонування систем опалення та вентиляції, якість природного освітлення приміщень, рівень звукоізоляції, архітектурну виразність інтер'єру, а також на безпеку мешканців. Проектування віконних конструкцій у житлових будівлях регламентується чинними нормативами ДБН та ДСТУ [1, 2, 12 – 14], але на сьогодні відсутня єдина узагальнена методика, яка б дозволяла обґрунтовано здійснювати вибір раціонального варіанта віконної конструкції з усієї множини доступних рішень.

Для розроблення моделі прийняття рішення щодо пошуку раціонального варіанта віконної конструкції необхідно визначити, систематизувати та формалізувати всі чинники, що впливають на кінцевий результат. Аналіз технічної документації, будівельних норм і наукових публікацій (розділ 1) та практичний досвід проєктантів (архітекторів, конструкторів) свідчить, що процес вибору віконних конструкцій вимагає врахування таких основних груп чинників:

- **функціональні вимоги**, які визначені у ДБН та ДСТУ [1 – 15] та передбачають необхідність дотримання мінімального допустимого нормативного термічного опору зовнішньої огорожувальної конструкції, в тому числі віконних конструкцій, базового рівня звукоізоляції; забезпечення нормативного рівня інсоляції та вентиляції приміщень, виконання норм безпечного відкривання й закривання віконних стулок тощо з урахуванням цільового призначення приміщень;

- **техніко-економічні вимоги** (бюджетні обмеження замовника та виробничі можливості підрядника). Проєкт віконних конструкцій має бути технічно реалізованим, не порушувати несучої здатності будівлі і узгоджуватись з визначеним кошторисом. Наприклад, замість шестикамерного ПВХ-профілю, який забезпечує підвищену тепло- та звукоізоляцію й високий рівень енергоефективності, в умовах обмеженого бюджету пріоритетним може стати вибір трикамерного або п'ятикамерного профілю. Таке рішення дозволить оптимізувати витрати, водночас забезпечивши виконання базових нормативних вимог (бюджетний варіант);

- **архітектурно-дизайнерські вимоги**, згідно з якими віконні конструкції мають гармонійно доповнювати стилістику фасаду та підтримувати композиційну цілісність споруди. Наприклад, розташування

будівлі в історичній забудові або її статус пам'ятки архітектури накладають жорсткі обмеження на зовнішній вигляд вікон. Водночас, вимоги замовника щодо забезпечення максимальної приватності можуть унеможливити інтеграцію в проєкт панорамних систем скління;

– **безпекові та ситуаційні обмеження**, що зумовлені кліматичними умовами регіону та просторовим розташуванням будівлі відносно інших об'єктів. Наприклад, якщо об'єкт проєктування знаходиться у потенційно небезпечних зонах (території бойових дій) або в безпосередній близькості до стратегічної чи критичної інфраструктури, виникає гостра потреба в посиленні захисних властивостей огорожувальної конструкції будівлі, в тому числі віконних конструкцій. У таких випадках доцільним стає застосування ударостійкого скління, зменшених розмірів шибок і спеціальної зламостійкої фурнітури.

Процес вибору віконної конструкції на стадії проєктування належить до класу багатокритеріальних задач, оскільки передбачає комплексне врахування значної кількості взаємопов'язаних технічних, економічних, архітектурних, естетичних та експлуатаційних показників та потребує визначення оптимального балансу між ними. На основі проведеного аналізу, критерії вибору віконних конструкцій пропонується класифікувати за п'ятьма основними категоріями, що дозволяє комплексно враховувати актуальні виклики безпеки, що особливо важливо у сучасних умовах:

- у1 «Енергоефективність»;
- у2 «Архітектурна привабливість та функціональність»;
- у3 «Ринкова вартість»;
- у4 «Захист від злому»;
- у5 «Стійкість до дії вибухової хвилі».

Прийняття обґрунтованого рішення щодо вибору раціонального варіанта віконної конструкції вимагає застосування системного підходу, що базується на формалізації всіх наведених критеріїв, їх кількісній чи якісній оцінці та встановленні їхньої вагомості (пріоритетності) залежно від ступеня впливу на загальну ефективність проєкту. Кожний з наведених критеріїв формується під дією низки локальних факторів, які, своєю чергою, визначають підсумкове значення відповідного показника. Для побудови дієвої математичної моделі вибору необхідно детально проаналізувати кожен з п'яти виділених категорій. У наступних підрозділах проведено формалізацію узагальнених критеріїв з визначенням їхнього фізичного та експлуатаційного змісту.

2.2 Енергоефективність

Забезпечення енергоефективності є одним із фундаментальних пріоритетів сучасного проектування житлових будівель [12 – 15]. Визначальну роль у формуванні енергетичних характеристик об'єкта відіграє його теплоізоляційна оболонка. Під час розрахунку теплотехнічних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій необхідно брати до уваги кожен її елемент, оскільки всі вони безпосередньо впливають на інтегральні показники енергоефективності будівлі [12, 14, 19, 30, 33]. У структурі теплоізоляційної оболонки віконні конструкції посідають особливе місце, що зумовлено їхнім подвійним впливом на тепловий баланс приміщення. З одного боку, у холодний період року вони є джерелом тепловтрат, які виникають внаслідок кондукції (через склопакет і раму), конвекції (через нещільності стиків), а також через утворення теплових містків у вузлах примикання. З іншого боку, саме через світлопрозорі конструкції відбувається надходження корисної сонячної енергії (за рахунок прямого та дифузного випромінювання), що дозволяє знизити витрати на опалення. З огляду на цю специфіку, необґрунтоване збільшення площі скління або низькі теплотехнічні параметри вікон можуть призвести до негативного синергетичного ефекту: одночасного зростання тепловтрат узимку та надмірного надходження тепла влітку, що, своєю чергою, суттєво підвищує енергетичні навантаження на системи охолодження та кондиціювання.

2.2.1 Оцінка впливу площі скління на приведений опір теплопередачі зовнішньої стіни

Параметри вікон (розмір, кількість та розташування) впливають на теплові втрати та теплонадходження в приміщення через зовнішні огорожувальні конструкції [12, 14, 19, 30, 33, 61]. Частка тепловтрат через вікна у типових житлових будинках становить від 10 - 40% залежно від якості скління та питомої площі вікон. Застосування енергоефективних світлопрозорих конструкцій здатне скоротити ці втрати у 2 – 3 рази, що свідчить про значний потенціал енергозбереження [19, 37, 42].

Вимоги до енергоефективності віконних конструкцій регламентуються будівельними нормами [12, 14]. Вікно класу «А» утримує тепло взимку приблизно на 50% краще порівняно з нормативним класом «С», тоді як вікно класу «Е» втрачає на 40% більше тепла, ніж нормативне. Отже, конструкції вікон класу «А» споживають у 2,5 рази менше енергії

на опалення, ніж клас «Е». Класи енергоефективності базуються на значеннях приведенного опору теплопередачі [43]. Віконним блокам з показником нижче $0,35 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ клас не присвоюють. При визначенні енергоефективності вікон (світлопрозорих конструкцій) на стадії проектування враховують такі фактори [2, 3, 14, 17, 43]:

- температурну зону (залежно від місця розташування об'єкта);
- розміри та тип вікна;
- орієнтацію за сторонами світу;
- конструктивні особливості (матеріал профілю, камерність склопакета, тип скла, дистанційна рамка);
- повітропроникність.

Зазначені показники є основою для автоматизованого розрахунку в «Енергокалькуляторі вікон» [43] в якому на основі вихідних даних обчислюється опір теплопередачі та встановлюється клас енергоефективності вікна (А – Е) рис. 2.1.

Розмір віконної конструкції впливає на приведений термічний опір усієї зовнішньої огорожувальної конструкції.

Енергокалькулятор вікон і дверей OKNA.ua

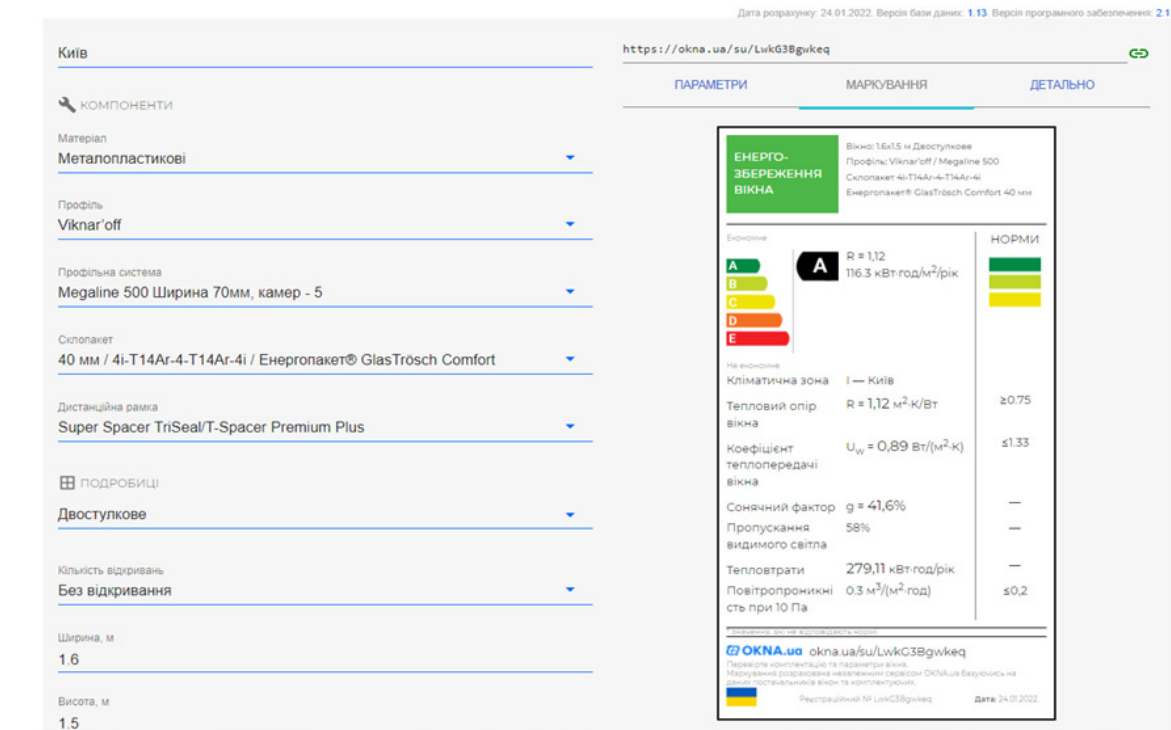


Рисунок 2.1 – Результатів розрахунку енергоефективності вікон енергокалькулятором [43]

Відповідно до будівельних норм [14], обов'язковою є умова:

$$R_{\Sigma np} \geq R_{q \min} , \quad (2.1)$$

де $R_{\Sigma np}$ – приведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції або приведений опір теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$R_{q \min}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

З врахуванням системного принципу проєктування енергоефективних огорожувальних конструкцій відповідно до ДБН [14] необхідно забезпечення санітарно-гігієнічних вимог та умови теплової надійності:

$$\Delta \theta_{\text{int-si}} \geq \Delta \theta_{\text{int-si,max}} , \quad (2.2)$$

$$\theta_{\text{tb,si,min}} = \theta_{\text{si,min}} , \quad (2.3)$$

де $\Delta \theta_{\text{int-si}}$ – різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta \theta_{\text{int-si,max}}$ – допустима за санітарно-гігієнічними нормами різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_{\text{tb,si,min}}$ – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_{\text{si,min}}$ – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні, $^{\circ}\text{C}$.

Для аналізу впливу розміру віконної конструкцій розглянемо фрагмент фасаду у м. Вінниці (I температурна зона) розміром 2,7 м x 4,10 м у межах одного поверху зовнішньої стіни будівлі. Загальна площа фасаду стіни $F = 11,07 \text{ м}^2$

Склад конструкції:

- внутрішня штукатурка ($\delta = 20 \text{ мм}$, $\lambda = 0,93 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);
- несуча частина стіни з керамічної цегли ($\gamma = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\delta = 510 \text{ мм}$; $\lambda = 0,81 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);
- утеплювач мінераловатні плити ROCKWOOL ($\delta = 180 \text{ мм}$, $\lambda = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), закріплені пластиковими дюбелями (8 шт./ м^2),
- зовнішня штукатурка ($\delta = 5 \text{ мм}$, $\lambda = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$).

Для аналізу впливу розміру віконної конструкції розглянуто три варіанти віконний прорізів (див. рис. 1.2):

- стандартне вікно 1,50 м x 1,50 м;
- збільшене вікно 2,20 м x 1,50 м;
- панорамне вікно 2,20 м x 2,40 м.

Опір теплопередачі основного поля зовнішньої стіни обчислюється за формулою [5]:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_6} + \sum_{i=1}^h \frac{\delta_i}{\lambda_{inp}} + \frac{1}{\alpha_3}, \quad (2.4)$$

де δ_i – товщина i -го шару зовнішніх стін, м;

λ_{inp} – розрахункова теплопровідність матеріалу i -го шару зовнішніх стін в розрахункових умовах, Вт/(м·К).

$\alpha_6 = 8,7$ Вт/(м²·К); $\alpha_3 = 23,0$ Вт/(м²·К) – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь огорожувальної конструкції [5].

За заданими характеристиками шарів огорожувальної конструкції значення опору теплопередачі основного поля зовнішньої стіни: $R_{\Sigma} = 5,23$ м²·К/Вт. Приведений термічний опір непрозорої частини визначається з урахуванням площі та теплопровідних включень (відкосів, дубелів) [5]:

$$R_{\Sigma np} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^l \frac{F_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J K_j L_j + \sum_{k=1}^k \psi_k N_k}, \quad (2.5)$$

де F_{Σ} – площа непрозорої частини огорожувальної конструкції, м²;

$R_{\Sigma i}$ – загальний опір теплопередачі огорожувальної багатошарової конструкції, м²·К/Вт;

K – лінійний коефіцієнт теплопередачі теплопровідного включення, Вт/(м·К),

$K = 0,081$ – віконний відкос в зоні перемички;

$K = 0,064$ – віконний відкос в зоні підвіконня;

$K = 0,071$ – віконний відкос в зоні рядового примикання;

Ψ – точковий коефіцієнт теплопередачі, (Вт / К), $\Psi = 0,005$;

L – довжина теплопровідного включення, м.

У досліджуваних фрагментах (рис. 1.2) наявні такі теплопровідні включення, які належать до непрозорої огорожувальної конструкції:

- укуси віконного прорізу в зоні надвіконної перемички, підвіконня та рядового примикання – лінійні елементи;

- дюбелі для кріплення мінераловатних плит – точкові елементи.

Розрахункові площі та значення характеристик теплопровідних включень фрагментів фасадів наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розрахункові площі та теплопровідні включення фрагментів фасаду

Варіант	Площа вікна, м ²	Площа непрозорої частини фасаду м ²	Довжина лінійних включень, м		Точкові включення, шт.
			в зоні перемички/ підвіконня	рядового примикання	
Стандарт 1,5 × 1,5 м	2,25	8,82	1,50/1,50	1,50	71
Збільшене 2,2 × 1,5 м	3,30	7,77	2,20/2,20	1,50	62
Панорамне 2,2 × 2,4 м	5,28	5,79	2,20/2,20	2,40	46

Розрахунок приведенного опору теплопередачі $R_{\Sigma np}$ для фрагмента стіни зі стандартним вікном за формулою (2.5):

$$R_{\Sigma np} = \frac{8,82}{\frac{8,82}{5,23} + (1,5 \times 0,081 + 1,5 \times 0,064 + 1,5 \times 0,071 \times 2) + (71 \times 0,005)} = 3,6 \text{ м}^2 \text{ К / Вт.}$$

Результат розрахунку за формулою (2.5) наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок приведенного опору теплопередачі

Варіант	$R_{\Sigma np}$ м ² К / Вт,	Виконання умови (2.1) $R_{\Sigma np} \geq R_{qmin}$
Стандартне вікно	3,60	Умова (2.1) виконана згідно п. 5.2.1 [5]
Збільшене вікно	3,31	Умова (2.1) виконана згідно п. 5.2.1 [5]
Панорамне вікно	2,87	Умова (2.1) не виконана

Примітка: Згідно з п. 5.2.1 ДБН [5], допускається зниження нормативного опору до рівня 80 % від R_{qmin} ($0,8 \times 4,0 = 3,2$ м² К/Вт) за умови дотримання санітарно-гігієнічних вимог за формулами (2.2) та (2.3).

Порівняння результатів приведеного опору теплопередачі непрозорої частини огорожувальної конструкції з віконними прорізами різних розмірів наведено на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Порівняння приведеного опору теплопередачі зовнішньої стіни залежно від розміру вікна

Результати розрахунків свідчать, що при однакових теплотехнічних характеристиках стіни, але різних розмірах вікон, приведений опір теплопередачі суттєво змінюється. Для стіни без віконних прорізів цей показник значно перевищує норму. Проте у випадку панорамного скління приведений опір теплопередачі стіни становить нижчий за допустимий мінімум.

Висновок: будівельні норми [12, 14] чітко не регламентують розмір фрагмента фасаду, який необхідно приймати для розрахунку приведенного опору теплопередачі стіни. Це є «слабким місцем» нормативного підходу, оскільки в межах однієї будівлі частина приміщень (зі стандартними вікнами) за розрахунками буде відповідати нормі приведенного опору теплопередачі непрозорої частини стіни, а частина фасаду але з панорамними вікнами при тих же вихідних умовах не відповідає нормі приведенного опору теплопередачі непрозорої частини стіни. Аналіз впливу розміру вікон на приведений термічний опір зовнішньої стіни також досліджено в попередніх роботах автора [17, 30, 42].

2.2.2 Формалізація та комплексна оцінка критерію «Енергоефективність»

Результати проведених розрахунків свідчать, що під час вибору вікон для забезпечення енергоефективності будівлі важливо враховувати не лише власні теплотехнічні характеристики вікна, а й вплив його розміру на приведений термічний опір зовнішньої стіни. Зазначимо, що відповідно до норм [12, 13], під час проектування теплоізоляційної оболонки (частиною якої є віконні конструкції) обов'язковим є виконання санітарно-гігієнічних вимог та вимог теплової надійності її елементів згідно з формулами (2.2) та (2.3).

На основі аналізу нормативних вимог та проведеного аналізу впливу розміру вікон на приведений термічний опір зовнішньої стіни, визначено що, критерій $y1$ «Енергоефективність» є комплексним показником який формується під дією двох локальних факторів (рис. 2.3):

X_{11} – опір теплопередачі вікна (рівень енергоефективності віконної конструкції);

X_{12} – приведений термічний опір зовнішньої стіни будівлі (приміщення).

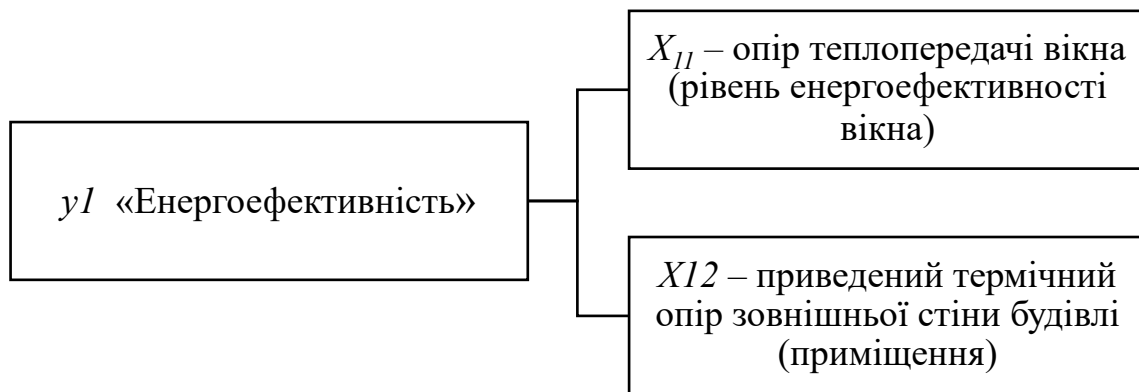


Рисунок 2.3 – Фактори, що визначають критерій $y1$ «Енергоефективність»

Для кількісно-якісної оцінки критерію $y1$ «Енергоефективність» пропонується застосовувати чотирирівневу шкалу: граничний, нормативний, покращений та інноваційний рівні.

Визначення критерія $y1$ залежно від значень факторів X_{11} , X_{12} наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Матриця оцінювання критерія y_1 за факторами X_{11} , X_{12}

Рівень критерію y_1	Фактор X_{11} (опір теплопередачі вікна)	Фактор X_{12} (приведений термічний опір стіни)
Граничний рівень	Значення X_{11} або X_{12} нижче мінімально допустимого рівня згідно ДБН [5]	
Нормативний рівень	Відповідає мінімальному нормативному значенню R_{qmin} (клас енергоефективності вікна С або D)	Допускається зниження нормативного термічного опору до рівня 80 % від R_{qmin} за умови дотримання санітарно-гігієнічних вимог за формулами (2.2) та (2.3).
Покращений рівень	Відповідає класу енергоефективності вікна В або С (у межах нормативних значень)	У межах нормативних значень або відповідає класу енергоефективності зовнішньої стіни С
Інноваційний рівень	Відповідає класу енергоефективності А або В (перевищує мінімальні нормативні значення)	Перевищує нормативне значення або відповідає класу енергоефективності стіни А або В.

2.3 Формалізація та оцінка критерію «Архітектурна привабливість та функціональність»

Віконні системи концептуально доповнюють та/або завершують архітектурний стиль і дизайн будівлі. Просторові та візуальні характеристики віконних конструкцій (розташування, розмір, пропорції, форма, конфігурація, кольорове рішення профілю, а також тип фурнітури) безпосередньо впливають на екстер'єр фасаду, забезпечуючи його завершений образ та естетичну виразність.

В інтер'єрі віконні конструкції часто виконують функцію візуального розширення житлового простору та його природного освітлення (інсоляції), а також впливають на ергономіку та приватність приміщення. Дизайн вікон урізноманітнюють за рахунок декорування склопакетів (вітражі, використання різних видів архітектурних плівок). Важливим під час вибору вікон є забезпечення приватності приміщення. Ця вимога набуває особливого значення для квартир із панорамним склінням, яке є сучасним трендом у секторі багатоповерхового житлового будівництва. Оскільки значна площа прозорих огорожувальних конструкцій відкриває огляд не лише зсередини, але й ззовні, для забез-

печення приватності застосовують тонування склопакетів, сонцезахисні системи (жалюзі) та віконний текстиль.

Архітектурна привабливість віконної конструкції – це комплексна характеристика, що визначає рівень естетичного задоволення користувачів. Ця оцінка базується на синтезі візуальних, естетичних та конструктивних аспектів вікон. Цей показник є частково суб'єктивним і багато в чому залежить від індивідуальних уподобань замовника.

Віконні конструкції мають бути виконані згідно з технічними вимогами за ДСТУ [1 – 4] щодо: інсоляції, освітленості приміщення, довговічності, експлуатаційної надійності, шумоізоляції, звукоізоляції та класу повітропроникнення. Для визначення функціональних параметрів, таких як повітропроникність, шумоізоляція, світлопропускання залежно від варіанту віконної конструкції використовують спеціалізовані програмні комплекси, наприклад, «Енергокалькулятор вікон і дверей» [43]. Вихідними даними для визначення функціональних характеристик вікон при розрахунку є інформація про:

- компоненти віконної конструкції – матеріал, профіль, профільна система, склопакет, дистанційна рамка;
- вид вікна (одностулкове, двостулкове тощо), ширина, висота, кількість відкривань;
- зовнішні умови – орієнтація за сторонами світу, наявність зовнішнього затінення (сонцезахисту), тип системи опалення.

Функціональні вимоги до віконних конструкцій забезпечуються шляхом варіювання їх конструктивної комплектності. Наприклад, на повітропроникність вікна суттєво впливає узгодженість ущільнювачів із профільною системою та фурнітурою. Під час вибору вікон необхідно враховувати взаємозв'язок між окремими компонентами конструкції та оцінювати зміну її функціональних характеристик залежно від варіації комплектності (рис. 2.4). Функціональні характеристики вікон також визначаються параметрами профілю, типом профільної системи та якісним складом склопакета. Рівень функціональності вікон може бути підвищений завдяки застосуванню спеціалізованої фурнітури та додаткових конструктивних елементів, зокрема ручок, петель, запірних механізмів, вентиляційних пристроїв (клапанів), а також систем автоматизованого відкривання та закривання. При цьому важливо забезпечити узгоджений підбір усіх компонентів із урахуванням функціонального призначення приміщення та експлуатаційних потреб користувачів.


Світлопропускання	49.03 %	
Склопакет		Двокамерний 44 мм з двома і-склами, аргон
Профіль	Пластиковий-профіль	Металопластиковий профіль 70 мм
Тип вікна	Одностулкове	
Кількість відкривань	1	
Ширина	1 м	
Висота	1.5 м	
Повітропроникність при 10 Па	0.3 м ³ /(м ² -год)	
Повітропроникність при 100 Па	3 м ³ /(м ² -год)	
Коефіцієнт теплопередачі склопакета U_g	0.57 Вт/(м ² -К)	
Шумоізоляція	28 дБА	
Клас шумоізоляції	Д	
УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ		
Кількість вікон	1	
Орієнтація	Південь	
Зовнішня тінь	Відсутнє	

Рисунок 2.4 – Результати розрахунку технічних та функціональних характеристик віконної конструкції [43]

Експертний досвід архітекторів та проєктантів свідчить, що архітектурна привабливість та функціональність відіграють важливу роль під час проєктуванні і можуть виступати як один з пріоритетів при виборі віконної конструкції. На основі проведеного аналізу визначено, що критерій у2 «Архітектурна привабливість та функціональність» базується на трьох локальних факторах (рис. 2.5):

- X_{21} – естетика та дизайн: визначається формою, пропорціями, дизайном віконної конструкції; наявністю архітектурних обмежень у виборі форми та розмірів, пропорцій вікна; інтеграцією вікон у наявний архітектурний стиль; нестандартною та складною фор-

мою (еркерне вікно, панорамне, кутове тощо). Цей фактор передбачає оцінку зовнішнього вигляду віконної конструкції, її форми, ліній, кольорового рішення, текстури та гармонійної взаємодії з екстер'єром та інтер'єром, а також унікальності архітектурного рішення й відповідності сучасним тенденціям у дизайні.

- X_{22} – характеристики профілю, профільної системи та склопакета: відображає базову функціональність (технічні характеристики), що визначається якістю базових матеріалів (профільної системи та склопакета), які забезпечують надійність конструкції, її довговічність і підвищують загальний базовий комфорт користування.
- X_{23} – додаткові елементи та фурнітура, що формує розширену функціональність та ергономіку, включає застосування спеціалізованої фурнітури та додаткових конструктивних елементів (систем провітрювання, автоматизації тощо), які максимально розширюють можливості вікна, підвищують технічний рівень конструкції та задовольняють індивідуальні потреби користувачів.

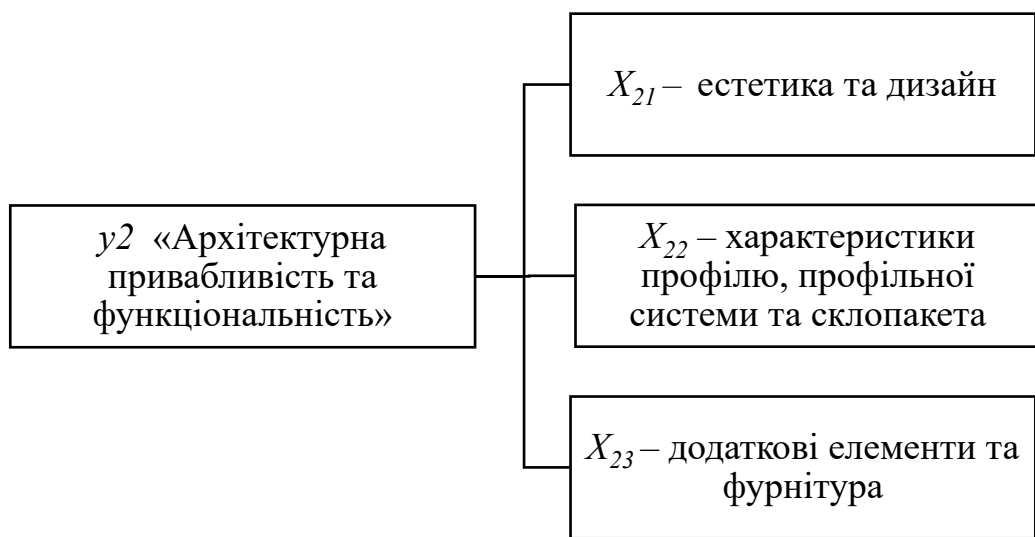


Рисунок 2.5 – Фактори, що визначають критерій y_2 «Архітектурна привабливість і функціональність»

Опис та оцінку факторів X_{21} , X_{22} , X_{23} для визначення критерію y_2 представлено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Оцінка та деталізований опис факторів X_{21} , X_{22} , X_{23}

Фактор	Оцінка	Опис фактора для відповідного рівня
1	2	3
X_{21} Естетика та дизайн	1. Низький рівень	Прості (стандартні) прямокутні форми вікна, базовий дизайн без індивідуальних архітектурних особливостей, мінімальна (типова) інтеграція в архітектурний стиль будівлі.
	2. Середній рівень	Привабливий дизайн із помірною складністю форм і пропорцій; застосування базової ламінації профілю; гармонійна, але стандартна інтеграція у наявний стиль фасаду.
X_{21} Естетика та дизайн	3. Високий рівень	Нестандартні та складні форми (еркерні, панорамні, кутові, арочні вікна); індивідуальні пропорції; наявність декоративних елементів (вітражі, розкладки); ідеальна інтеграція в архітектуру та відповідність сучасним тенденціям дизайну.
X_{22} Характеристики профілю, системи та склопакета	1. Стандартні	Використання базових ПВХ-профілів (класу «В» або нижче), що мають достатню міцність для типових житлових будівель; застосування стандартних склопакетів із базовим набором характеристик.
	2. Середні	Використання профілів покращеної якості (класу «В» або «А») для конструкцій з підвищеними вимогами; застосування енергоефективних склопакетів, якість яких підтверджена сертифікатами відповідності.
	3. Високі	Застосування профілів найвищої якості (класу «А») з максимальною стійкістю до вітрових навантажень; можливість реалізації конструкцій із різних матеріалів та складних фігурних деталей; найвищі функціональні параметри звуко- і шумоізоляції склопакетів.

Продовження таблиці 2.4

1	2	3
X_{23} додаткові елементи та фурнітура	1. Відсутні (стандартне вікно)	Використання лише базової (стандартної) фурнітури для відкривання та закривання; відсутність додаткових конструктивних рішень для розширення функціональності.
	2. Наявні	Застосування спеціалізованих систем: вентиляційних пристосувань (клапанів), систем автоматизованого відкриття/ закриття, вбудованих жалюзі, прихованих петель тощо, що суттєво розширює функціональність та ергономіку.

Для забезпечення об'єктивності та алгоритмічної прозорості процесу прийняття рішень доцільно використовувати матричний підхід. Підсумкове значення комплексного критерію y_2 визначається залежно від комбінації отриманих оцінок за локальними факторами X_{21} , X_{22} , X_{23} згідно з оцінюванням, наведеним у табл. 2.5. Критерій y_2 оцінюється рівнями: низький, середній, високий.

Таблиця 2.5 – Матриця оцінювання критерію y_2 «Архітектурної привабливості та функціональності» за факторами

Оцінка критерію y_2	Якісна характеристика віконної конструкції	Формальні умови за факторами X_{21} , X_{22} , X_{23}
1	2	3
Базовий (стандартний) рівень	Вікно з базовими архітектурними та функціональними рішеннями, що забезпечує мінімально допустиму узгодженість з архітектурою будівлі.	Усі фактори мають мінімальне значення: X_{21} – «низький»; X_{22} – «стандартні»; X_{23} – «відсутні» .
Середній рівень	Вікно має привабливий, проте типовий вигляд; характеризується помірною складністю естетики та дизайну або частково розширеним функціоналом.	Перевищення базового рівня без досягнення максимального: якщо хоча б один із факторів X_{21} , X_{22} , X_{23} оцінено вище базового (показник > 1), але жоден із факторів X_{21} чи X_{22} не має оцінки «високий».

Продовження таблиці 2.5

1	2	3
Високий рівень	Вікно відрізняється відмінною сумісністю з архітектурою будівлі (індивідуальний дизайн) та/або найвищим рівнем технічної функціональності.	Досягнення максимуму за ключовими факторами: Фактор X_{21} оцінено як «високий» та/або Фактор X_{22} оцінено як «високий» (незалежно від значення X_{23}).

2.4 Формалізація критерію «Ринкова вартість»

Оцінка доцільності вибору віконних конструкцій неможлива без урахування їхньої вартості. Критерій $у3$ «Ринкова вартість» (або ринкова ціна) є багатокомпонентним показником, що визначається комплексом техніко-економічних факторів і може суттєво варіюватися залежно від виробничої політики компаній та конкретних проєктних характеристик вікон. Основні фактори, які формують критерій $у3$, декомпонуються на такі локальні чинники (рис. 2.6):

- X_{31} Вартість базисних матеріалів та компонентів. Цей показник безпосередньо залежить від типу профільної системи (дерево, алюміній, ПВХ або комбіновані матеріали). Крім того, застосування багатокамерних склопакетів або скла з покращеними ізоляційними (енергозберігаючими, сонцезахисними) властивостями пропорційно підвищує підсумкову ціну вікна.
- X_{32} Конфігурація та складність (архітектурно-конструктивна) вікна. Габаритні (панорамні) конструкції, а також вироби нестандартної форми (арочні, трапецієподібні) потребують більшої трудомісткості виготовлення. Відповідно, використання специфічних комплектуючих, додаткових функціональних елементів та застосування технологій декорування (наприклад, архітектурна ламінація профілю) призводять до подорожчання виробу.
- X_{33} Брендування, виробнича логістика та регіональні фактори. Продукція від провідних виробників з високим рівнем довіри на ринку традиційно має цінову премію за репутацію та гарантовану якість. Водночас ціноутворення має виражену регіональну диференціацію, що зумовлено різницею в податковому навантаженні, витратах на транспортну логістику та іншими макроекономічними факторами.

Зазначимо, що інтегрована оцінка факторів X_{31} , X_{32} , X_{33} імпліцитно (опосередковано) закладена у кінцеву вартість конструкції виробником або дистриб'ютором. Водночас відповідно до підходу оцінювання вартості життєвого циклу (*Life-Cycle Costing*), викладеного в [78, 79], при

виборі віконних конструкцій доцільно враховувати не лише початкові (капітальні) витрати, але й витрати на експлуатацію, обслуговування та утилізацію. У зв'язку з цим орієнтація виключно на мінімізацію капітальних витрат є методично необгрунтованою та може призводити до не-ефективних рішень у довгостроковій перспективі [78, 79]. Віконні конструкції з мінімальною вартістю, як правило, не передбачають застосування сучасних інноваційних рішень, необхідних для дотримання нормативних вимог щодо тепло- і звукоізоляції, а також безпеки.

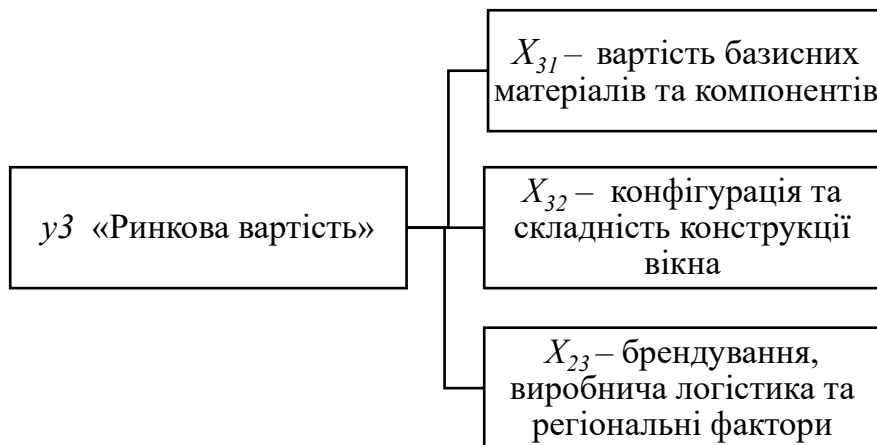


Рисунок 2.6 – Фактори, що визначають критерій уЗ «Ринкова вартість»

Зокрема, у бюджетних ПВХ-конструкціях виробники можуть замінювати стандартні механічні з'єднувачі імпоста дешевшими аналогами, вартість яких є суттєво нижчою. У довгостроковій перспективі це може призводити до розгерметизації стиків, скорочення терміну експлуатації та втрати функціональних характеристик вікна. Крім того, до загальної вартості реалізації проєкту часто включаються витрати на монтаж конструкції та влаштування укосів, що обумовлює залежність підсумкової вартості від обраної технології встановлення (наприклад, базовий монтаж або монтаж із застосуванням спеціальних паро- та гідроізоляційних стрічок).

Оцінювання критерію уЗ здійснюється шляхом його класифікації за ціновим сегментами, при цьому залежно від сукупності характеристик виокремлюють три основні рівні [77]:

- Сегмент «*ЕКОНОМ*» (низький ціновий рівень): включає вікна з мінімальною ринковою вартістю, що виготовлені з базових матеріалів. Вони забезпечують лише мінімально допустимі (граничні) нормативні вимоги, характеризуються меншою енергоефективністю та обмеженим набором функцій.
- Сегмент «*ОПТИМАЛЬНИЙ*» (середньоринковий рівень): пропонує раціональне співвідношення «ціна-якість». Вікна цього класу відрізняються вищою енергоефективністю, покращеною звукоізоляцією

та ширшим варіативним рядом удосконаленої фурнітури порівняно з бюджетним варіантом.

- Сегмент «*МАКСИМУМ*» (преміальний рівень): включає високотехнологічні вікна з розширеним набором функцій. Вони вирізняються максимальними теплоізоляційними характеристиками, використанням інноваційних матеріалів та передових технологій у фурнітурі (наприклад, систем автоматизації та протизламності). Вікна цього сегменту призначені для споживачів, які цінують безкомпромісний комфорт, ефективність і безпеку, розглядаючи збільшені капіталовкладення як довгострокову інвестицію.

У разі, якщо альтернативні варіанти віконних конструкцій належать до одного цінового сегмента та мають однакові габаритні розміри, формалізоване оцінювання критерію у³ доцільно здійснювати на основі прямого математичного порівняння їх вартості, наведеної у комерційних пропозиціях виробників.

2.5 Формалізація критерію «Захист від злому»

Забезпечення фізичної безпеки мешканців є базовою вимогою до проектування житлового та комерційного простору. Оскільки вікна є зовнішніми огорожувальними конструкціями та найбільш вразливими елементами фасаду, критично важливим при їх виборі є рівень захисту від злому і несанкціонованого проникнення. Цю властивість формалізовано через критерій у⁴ «Захист від злому», який визначає здатність віконних елементів протистояти зовнішньому силовому впливу, а також безпеку їхньої експлуатації та функціональність систем контролю руху.

За даними галузевих досліджень та звітів у сфері безпеки [75], значна частка несанкціонованих проникнень до будівель здійснюється через віконні конструкції, що робить їх одним із найбільш вразливих елементів огорожувальної оболонки, особливо на перших та останніх поверхах. Більшість зломів відбувається шляхом силового впливу (віджим стулки 81 % або руйнування скління 8%), що підтверджує визначальну роль фізичної міцності конструкції. Зламостійкість вікна є комплексним показником, що визначається сукупною дією таких конструктивних елементів, як фурнітура, склопакет, профільна система та запірні пристрої [65, 70].

Ключовим фактором ефективного захисту є час опору конструкції зламуванню: у разі неможливості швидкого проникнення зловмисники, як правило, відмовляються від подальших дій. Саме тому здатність віконної конструкції забезпечувати регламентований опір зламу, що нормується класами RC1, RC2/ RC2N, RC3. (табл. 2.6) відповідно до ДСТУ EN 1627 [9], є критично важливою, особливо за наявності систем охоронної сигналізації.

Починаючи з другого класу стійкості до злому (RC2) нормативно передбачено застосування ударостійкого захисного скла (склопакету), здатного протистояти ручному зламу. Відповідно до ДСТУ EN 356:2005 [25] класифікація такого скла здійснюється за рівнем опору багаторазовим ударам вільно падаючого тіла регламентованої маси. Склопакети класів P1A – P5A відносяться до категорії антивандального скління. Вони забезпечують захист від випадкових або навмишних механічних пошкоджень. Найбільш поширеними та стійкими до злому варіантами для житлового будівництва є склопакети класів P4A та P5A [25]. Ці класи рекомендуються для підвищення загальної проти-зламної стійкості віконних конструкцій.

Підтвердження протизламних характеристик є складним і трудомістким процесом, який включає серію обов'язкових випробувань у акредитованих лабораторіях. На сьогодні в Україні вже з'явилися виробники, які проводять комплексні випробування у сертифікованих лабораторіях і мають відповідні ліцензії на виготовлення зламостійких віконних конструкцій класу RC2.

Таблиця 2.6 – Класифікація вікон за ступенем стійкості до злому

Клас стійкості	Технічна характеристика та рівень захисту	Рекомендована сфера застосування
RC1	Вікно зі звичайним склопакетом, що забезпечує базову стійкість до застосування фізичної сили без використання інструментів (удари кулаком, плечем тощо).	Оптимально для других і останніх поверхів будівель.
RC2 / RC2N	Вікно зі звичайним (RC2N) або безпечним склопакетом класу не нижче P4A (RC2) та спеціальною протизламною фурнітурою. Мінімальний час опору до злому із застосуванням простих інструментів (викрутки, клини, розвідний ключ) не менше 3 хвилин.	Ефективно використовувати на перших поверхах та в приватних будинках.
RC3	Вікно з безпечним склопакетом (клас P5A). Мінімальний час опору до злому із застосуванням розширеного набору інструментів (легкий молоток, дріль) не менше 5 хвилин.	Об'єкти з підвищеними вимогами до безпеки (комерційні приміщення, ізольовані будинки).

Особливо важливим критерій протизламної стійкості y_4 (у тому числі клас скла) стає при виборі панорамних вікон, а також вікон, розташованих на перших, других та останніх поверхах будівель. Саме ці зони є найбільш вразливими з точки зору несанкціонованого доступу, тому застосування ударостійкого скління класу не нижче P4A – P5A у поєднанні з протизламною фурнітурою RC2 значно підвищує загальний рівень безпеки житлового приміщення

На загальну експлуатаційну безпеку віконних конструкцій також суттєво впливає функціональність систем контролю руху стулок, що регламентується стандартом ДСТУ EN 13126-8:2022 [32]. Системи контролю руху повинні бути спроектовані так, щоб уникнути травмувань або небезпеки під час відкривання чи закривання вікна. Це передбачає застосування механізмів блокування, які перешкоджають ненавмисному відкриванню, а також використання демпферів або обмежувачів ходу стулки.

Важливим елементом забезпечення протизламної стійкості віконних конструкцій є фурнітура з відповідною кількістю протизламних елементів – грибоподібних цапф і запірних планок, встановлених на рамі та стулці. Вони забезпечують надійне зчеплення контуру вікна, утворюючи так звані «безпечні точки». Чим більша кількість таких точок, тим вищий клас стійкості до злому. Кількість протизламних точок залежить від розміру та конструктивних особливостей вікна, проте нормативна максимальна відстань між ними не повинна перевищувати 650 мм [32]. Відповідно до ДСТУ EN 13126-8:2022 [32], системи фурнітури для вікон та балконних дверей повинні відповідати вимогам щодо механічної міцності, довговічності та безпеки експлуатації, що безпосередньо впливає на загальну протизламну стійкість конструкції.

За проведеним аналізом визначено, що критерій y_4 «Захист від злому» визначається двома основними факторами впливу (рис. 2.7):

- X_{41} Стійкість основних елементів вікна до злому (профіль, склопакет);
- X_{42} Наявність додаткових зламостійких елементів (фурнітура, протизламні пари).

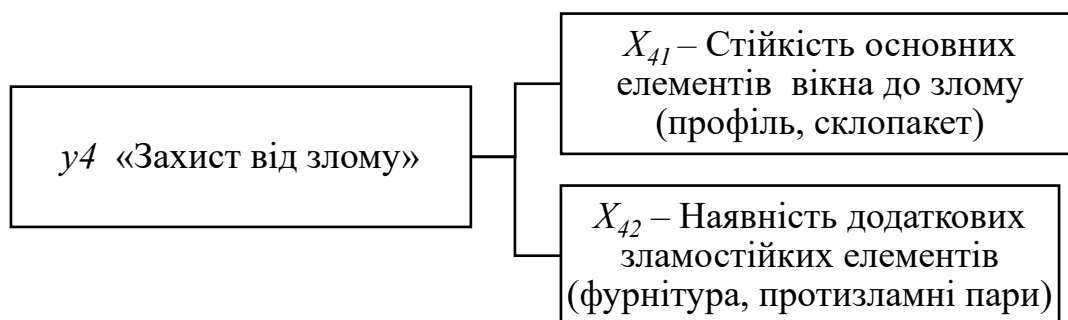


Рисунок 2.7 – Фактори, що визначають критерій y_4 «Захист від злому»

Опис та оцінку факторів X_{41} , X_{42} наведено у табл. 2.7

Таблиця 2.7 – Характеристика факторів X_{41} , X_{42} .

Фактор	Опис
X_{41} Стійкість основних елементів вікна до злому (профіль, склопакет)	Забезпечується міцністю матеріалів вікна та наявністю захисних покриттів, класом захисного скла (склопакету P1A – P5A). Ударостійке скло або скло з підвищеною міцністю може забезпечити додатковий рівень безпеки (клас RC2/RC2N, RC3).
X_{42} Наявність додаткових зламостійких елементів (фурнітура, протизламні пари)	Замки на вікнах мають бути надійними, протистояти несанкціонованому відкриттю ззовні. Рекомендована кількість протизламних пар (цапфа + зачіп) для вікна класу RC1: 4 (по одному в кожному кутку), RC2: усі зачепи повинні бути протизламними. Наявні зламостійкі елементи конструкції підсилюють рівень захисту

Підсумкове значення комплексного критерію y_4 , що визначається залежно від комбінації отриманих оцінок та комбінації факторів X_{41} , X_{42} , наведено у табл. 2.8. Критерій y_4 оцінюється рівнем: мінімальний, середній або високий.

Таблиця 2.8 – Оцінка критерію y_4 «Захист від злому»

Оцінка критерію y_4	Опис за комбінацією факторів X_{41} , X_{42}
Мінімальний рівень	Спеціальні функції захисту та стійкості до злому у конструкції вікна не передбачені. Використовуються стандартний склопакет та базова фурнітура (фактори X_{41} , та X_{42} мають базові значення).
Середній рівень	Вікно має лише окремі підсилені елементи захисту. Наприклад, встановлено або протизламну фурнітуру (X_{42} підвищено), або ударостійкий склопакет (X_{41} підвищено), але без комплексного поєднання.
Високий рівень	Вікно має комплексний захист, що включає якісний профіль з підвищеними характеристиками стійкості (замкнене армування), ударостійкий склопакет (триплекс) та протизламну фурнітуру по всьому периметру. Конструкція повністю відповідає стандартам (RC2, RC2N, RC3), що підтверджено сертифікатом виробника.

2.6 Формалізація критерію «Стійкість вікон до вибухової хвилі»

Забезпечення стійкості при вибуховій хвилі та у надзвичайних ситуаціях набуло актуальності в умовах перебування України у воєнному стані. Сьогодні значна кількість житлових будівель зазнає руйнувань, де однією з найпоширеніших форм пошкоджень є розбите віконне скло внаслідок дії вибухової хвилі.

Особи, які перебувають в зоні ураження, зазнають серйозних поранень через розлітання різноманітних уламків, серед яких домінує скло. За даними [27], близько 80% поранень та смертей серед цивільного населення у разі вибухів під час терактів чи бомбардувань спричинені первинними і вторинними осколками. З них 80% уражень – це травми від скла. Таким чином, до 64% усіх летальних випадків та поранень внаслідок вибуху завдаються розбитим віконним склом. Це пояснюється тим, що вікна є найбільш вразливими елементами будівлі порівняно зі стінами, колонами чи балками і руйнуються при значно нижчих значеннях надлишкового тиску.

Сучасні будівельні норми та стандарти традиційно регламентують низку важливих показників світлопрозорих конструкцій: теплоізоляційні характеристики, енергоефективність, повітропроникнення, світлопропускання, звукоізоляцію а також стійкість до несанкціонованого зламу. Однак вони практично не враховують одну з пріоритетних сьогодні характеристик – стійкість віконних конструкцій до дії вибухової хвилі та навантажень, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій техногенного чи воєнного характеру.

Останніми роками українські виробники вікон активно працюють над розробленням комплектації вибухостійких вікон [36, 38], проте системного нормативного регулювання цього питання немає.

Безпечність вікон у разі дії вибухової хвилі (мінімізацію ризиків руйнування віконної конструкції та ураження людей) пропонується визначити як комплексний критерій у5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі», що характеризує захищеність приміщення від вторинних факторів вибуху (розлітання скляних уламків, виривання стулок та рам).

Вибухова хвиля це збурення особливого роду, що виникає в навколишньому середовищі під час вибуху заряду вибухової речовини, пилу або газу, якому притаманне різке стрибкоподібне підвищення тиску й котре супроводжується стиском, нагріванням та зміною швидкості руху речовини. Поблизу осередку вибуху вибухова хвиля поширюється зі стрімкістю, що перевищує швидкість звуку в даному середовищі (утворюючи повітряну ударну хвилю). Основними параметрами, що характеризують руйнівну здатність вибухової хвилі, це надлишковий тиск (ΔP) та імпульс вибуху (рис. 2.8) [48, 52].

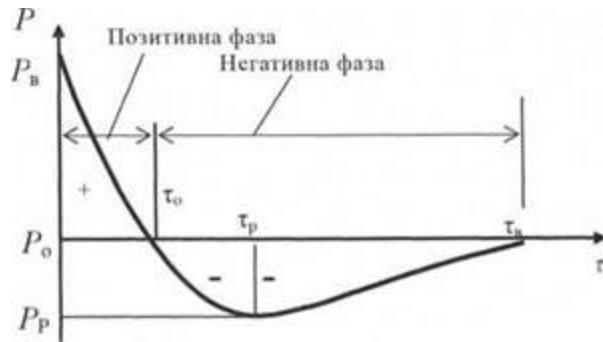


Рисунок 2.8 – Типовий профіль тиску ідеальної ударної хвилі [20]

Профіль тиску ідеальної ударної хвилі має дві чітко виражені фази (рис. 2.8). Позитивна фаза характеризується різким стрибком тиску до максимального значення (амплітуди надлишкового тиску) P_v та його подальшим спаданням до базового атмосферного тиску P_o протягом часу τ_0 . За нею настає негативна фаза (фаза розрідження), під час якої тиск зменшується нижче атмосферного (до мінімального значення P_p), після чого поступово нормалізується. Хоча саме параметри позитивної фази (P_v та тривалість τ_0) найчастіше використовують для розрахунку впливу вибуху на будинки і споруди, негативна фаза також відіграє важливу роль. Ефект всмоктування під час негативної фази створює зворотне навантаження, яке часто призводить до виривання віконних ступок чи склопакетів назовні будівлі [53, 54].

За відстанню зона дії повітряної ударної хвилі (r_3) є значно більшою, ніж зони безпосереднього осередку вибуху (r_1) та зона дії продуктів вибуху (r_2) (рис. 2.9). Для оцінки стійкості віконних конструкцій та розрахунку кривих вразливості критичне значення має саме зона 3 (r_3). Вона поширюється далеко за межі осередку вибуху, охоплює найбільшу площу міської забудови і формує надлишковий тиск, який є визначальним фактором руйнування фасадного скління [53, 56].

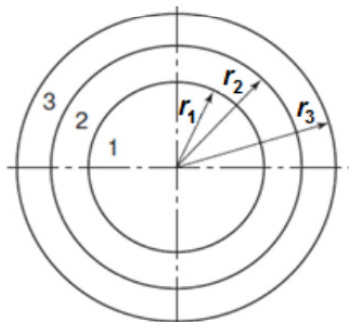


Рисунок 2.9 – Просторовий розподіл енергії вибуху газоповітряної суміші поділяють на три основні зони: 1 – зона детонаційної хвилі (r_1) 2 – зона дії продуктів вибуху (r_2); 3 – зона повітряної ударної хвилі (r_3) [20]

За даними міжнародних досліджень та аналізу наслідків вибухів повне руйнування будівлі відбувається при надлишковому тиску $\Delta P > 100$ кПа, середні пошкодження будівлі (з можливим відновленням) при $\Delta P \approx 28$ кПа, а повне руйнування скління вікон відбувається при надлишковому тиску понад 7 кПа. Приблизно 50 % руйнування скла спостерігається при 2,5 кПа, а часткове пошкодження вже при надлишковому тиску близько 2 кПа [52, 53, 54, 66]. При цьому осколки скла розлітаються зі значною кінетичною енергією і здатні завдавати тяжких, часто летальних травм [27, 36, 56, 58]. Найбільш імовірні режими відмови вікна локалізуються у склопакеті, вузлах «стулка – рама» та «рама – стіна» [52, 53] (табл. 2.9).

Таблиця 2.9 – Найбільш можливі режими відмови простого вікна

Локалізація	Тип відмови (руйнування)
Склопакет (скління)	Поломка через вигин посередині скла. Порушення вигину на краю скла біля затискного профілю. Витягування (випадіння) склопакета з профільного затиску.
Вузол «стулка – рама»	Поломка армуючого металу. Виривання фурнітури зі стулки або рами. Вихід з ладу ПВХ-профілів (руйнування каркаса).
Вузол «рама – стіна»	Зрізання анкерів (кріпильних елементів). Виривання анкерів з рами або цегляної кладки/стіни (випадіння вікна цілком).

Наукові підходи [48, 52, 53, 54, 65] щодо моделювання динамічної реакції спеціалізованих віконних конструкцій з підвищеною вибухо- та ударостійкістю на вибух, дослідження режимів руйнування та розльоту скла після ударного навантаження, а також питання вибухозахищеності скляних вікон з метою підвищення захисної здатності будівель підтверджують, що стійкість склопакета залежить від типу та товщини скла, наявності та якості полімерного прошарку (PVB або SGP), а також від взаємодії скла з профільною системою, фурнітурою та монтажним вузлом.

Зміцнення віконних конструкцій можливе на кількох рівнях:

- матеріальному (характеристики скла та плівок);
- конструктивному і монтажному (забезпечення ефективної взаємодії елементів конструкції).

На матеріальному рівні зміцнення досягається завдяки використанню ламінованого чи багатошарового скла або ударостійких плівок. Стійкість склопакета також поліпшується за рахунок якості супутніх

компонентів (клеї, ущільнювачі, арматура), що визначає загальну міцність конструкції [53, 54, 57].

Ідентифікація типу скла є критично важливим для прогнозування характеру його фрагментації (рис. 2.10):

- Звичайне (відпалене) скло розбивається на великі шматки з довгими гострими краями.
- Термозміцнене скло поводиться аналогічно, але орієнтовно є вдвічі міцнішим.
- Загартоване скло розлітається на дрібні фракції без гострих країв (умовно безпечні осколки).
- Ламіноване скло (триплекс) демонструє найвищу безпеку: навіть при розтріскуванні уламки надійно утримуються полімерним шаром.

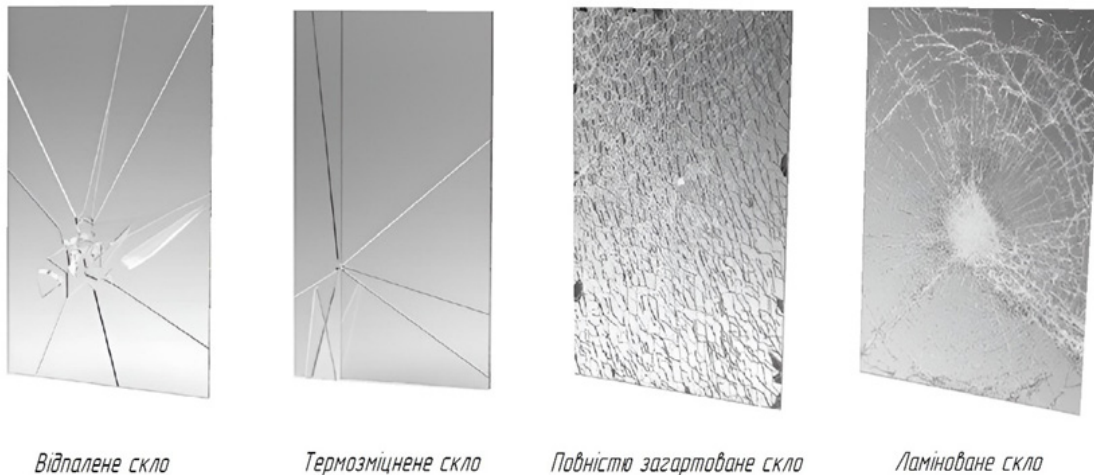


Рисунок 2.10 – Характеристики пошкодження різних видів скла при дії вибухової хвилі [27]

Альтернативним способом підвищення стійкості скла до розльоту уламків є нанесення ударостійкої захисної плівки SRF (Shatter Resistant Film) [64]. Водночас це рішення має суттєвий недолік для нових будівель – термін експлуатації плівки значно коротший за термін служби віконної конструкції, що зумовлює необхідність її регулярної заміни.

На конструктивному рівні досягнення стійкості вікон при дії вибухової хвилі забезпечується тим, що рама і система кріплення працюють як єдина система, перерозподіляючи навантаження між елементами таким чином, щоб у разі виходу з ладу одного або кількох елементів вся віконна система зберігала цілісність і несучу здатність. Фактично на конструктивному рівні стійкість вікон при дії вибухової хвилі забезпечується посиленням профілю та фурнітури. Оптимальним є випадок,

коли всі компоненти вікна є узгоджено (пропорційно) міцними. Наприклад, встановлення міцного ламінованого скла (товщиною 30 мм) у слабку раму або недостатньо міцну цегляну стіну нівелює загальну вибухостійкість системи, оскільки руйнуються саме несучі елементи.

Важливим фактором є габарити скління. Використання шибок невеликого розміру підвищує стійкість вікна та зменшує ризик розльоту скла [66]. Великі площі скла схильні до нерівномірного розподілу температури, температурних деформацій (розширення/стиснення) і, як наслідок, мають вищу схильність до утворення тріщин.

На монтажному рівні безпека вікон досягається збільшенням кількості та якості точок кріплення. За результатами аналізу реальних пошкоджень вікон від дії вибухової хвилі виявлено такі закономірності [38].

- Кріплення. Більшість вікон, які зазнали відриву від віконного прорізу (вилетіли цілком разом з рамою), були змонтовані на анкерних пластинах (часто з порушенням вимог ДСТУ щодо їхньої кількості).
- Фурнітура. Стулки були вирвані з конструкції переважно через руйнування фурнітури (зачепів або елементів кріплення з недостатньою жорсткістю, що фіксувалися одним шурупом)
- Площа та анкерування. Кількість кріплень повинна суворо відповідати вимогам ДСТУ [2]. Оскільки кількість анкерів пропорційна периметру вікна, а сила вибивання – площі вікна, ризик вибивання всієї конструкції має нелінійну залежність від її габаритів. Це підкреслює важливість належного закріплення віконної конструкції у прорізі, що досягається якісним анкетуванням: вибором конфігурації опори, типу і кількості анкерів, а також урахуванням міцності основи, в яку здійснюється кріплення. Отже, ризик руйнування вікна нелінійно зростає зі збільшенням його площі.

Зауважимо, що вибухостійкі, зламостійкі та кулетривкі вікна – це різні категорії, які не є тотожними. Ударостійкими згідно з ДСТУ EN 356:2005 [25] є склопакети, здатні витримувати багаторазовий удар вільно падаючого тіла (класи P1A – P5A). Емпіричні дослідження [36] демонструють, що звичайні зламостійкі вікна класу RC2 після реальних вибухів демонструють вищу живучість: скло тріскається, але не розлітається.

Сьогодні в Україні відсутня комплексна нормативна методика оцінки впливу руйнування вікон від вибухової хвилі на безпеку у житлових приміщеннях. Аналіз найбільш поширених світових стандартів вибухостійкості (UFC 4-010-01, GSA-TS01, ASTM F1642, ISO 16933) [27, 55, 56] наведено у табл. 2.10. Стандарти, приведені у табл. 2.10 мають власну методологію випробувань та систему класифікацій.

Таблиця 2.10 – Порівняльний аналіз міжнародних стандартів оцінювання вибухостійкості віконних конструкцій [27, 55, 56]

UFC 4-010-01 (США)	GSA- TS01	ASTM F1642	ISO 16933	UN Acceptability (ООН)
Не відповідають мінімальним вимогам (<i>Below AT Standards</i>)	5	6 – Висока небезпека (<i>High-hazard</i>)	F – Висока (<i>High</i>)	Неприйнятно (<i>Unacceptable</i>)
Дуже низький (<i>Very Low</i>)	4, 3b	5 – Низька небезпека (<i>Low hazard</i>)	E – Низька (<i>Low</i>)	Неприйнятно (<i>Unacceptable</i>)
Низький (<i>Low</i>)	3a	4 – Дуже низька небезпека (<i>Very low-hazard</i>)	D – Дуже низька (<i>Very low</i>)	Прийнятно, якщо інциденти з вибухом малоймовірні (<i>Acceptable if unlikely blast incidents</i>)
Середній (<i>Medium</i>)	2	3 – Мінімальна небезпека (<i>Minimal-hazard</i>) 2 – Немає небезпеки (<i>No-hazard</i>)	C – Мінімальна (<i>Minimum</i>) B – Немає небезпеки (<i>No-hazard</i>)	Прийнятно (<i>Acceptable</i>)
Високий (<i>High</i>)	1	1 – Без руйнувань (<i>No break</i>)	A – Без розривів (<i>No break</i>)	Прийнятно (<i>Acceptable</i>)

В Україні процедура випробування вікон на стійкість до дії вибуху регламентується державними стандартами ДСТУ [10, 11]. Згідно з цими нормами класи вибухостійкості (EXR1 – EXR5) визначаються за результатами натурних випробувань. Першому (найнижчому) класу вибухостійкості EXR1 відповідає вікно, яке після підриву 3 кг тротилу на відстані 5 метрів залишається закритим і не утворює небезпечних осколків з боку приміщення.

Класи вибухостійкості від EXR1 до EXR5 розташовані у порядку зростання їхнього опору тиску повітряної ударної хвилі (табл. 2.11).

Таблиця 2.11 – Класи тривкості, маса вибухового заряду і відстань [10, 11]

Клас тривкості	Маса вибухового заряду, кг	Відстань, м
EXR1	3	5,0
EXR2	3	3,0
EXR3	12	5,5
EXR4	12	4,0
EXR5	20	4,0

Для формалізації факторів, що впливають на комплексний критерій у5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі», доцільно спиратися на перевірені міжнародні методології (Information Bulletin Blast protection for windows, звіти GSA General Services Administration) [27, 55] та емпіричні дані вітчизняних досліджень щодо поведінки вікон під час реальних вибухів [36, 38],

Методологія GSA-TS01-2003 щодо оцінки вибухостійкості вікон та розльоту уламків проілюстрована на рис. 2.11 [55]. Згідно з цією методикою, для оцінки наслідків моделюється тестова кімната завглибшки приблизно 3 метри. Вибух ініціюється зовні, створюючи надлишковий тиск на віконний блок.

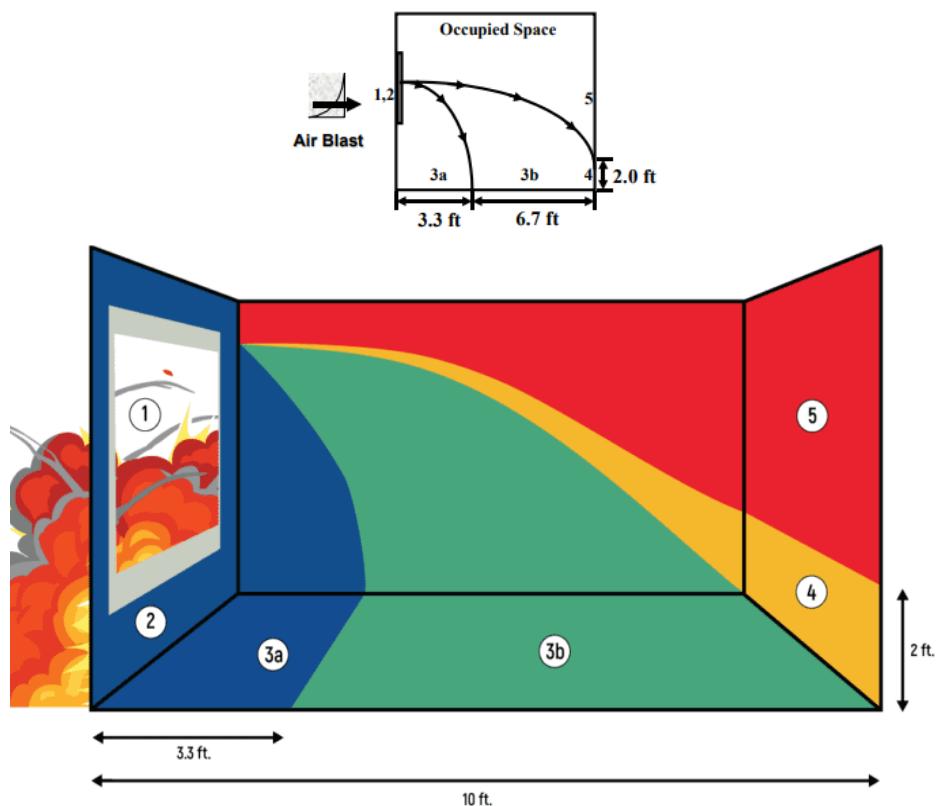


Рисунок 2.11 – Критерії небезпеки осколків скла при руйнуванні згідно GSA-TS01-2003 [55]

Реакція скління (відображена кольоровими зонами на рис.2.11) класифікується залежно від характеру пошкоджень та дальності розльоту уламків (табл. 2.12): від ідеального збереження вікна (зона 1) до повного руйнування системи з розкиданням уламків по всій кімнаті (зона 5). Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити рівень небезпеки для людей, які перебувають у приміщенні під час вибуху.

Таблиця 2.12 – Критерії небезпеки осколків скла при руйнуванні згідно GSA-TS01-2003 [55]

Зона пошкодження	Рівень захисту (Protection Level)	Рівень небезпеки (Hazard Level)	Опис реакції віконної системи Window Glazing Responce
1	Безпечний	Відсутній	Скло не ламається. Відсутні видимі пошкодження скління та рами.
2	Дуже високий	Відсутній	Скло тріскається, але надійно утримується рамою. Допускається наявність скляного пилу або мікроосколків безпосередньо на підвіконні чи на підлозі біля нього.
3a	Високий	Дуже низький	Скління руйнується (має тріщини). Фрагменти скла падають на підлогу не далі ніж на 3,3 фута (1 м) від вікна
3b	Високий	Низький	Скління руйнується. Фрагменти скла розлітаються і падають на підлогу не далі ніж 10 футів (3м) від вікна.
4	Середній	Середній	Скління руйнується. Фрагменти розлітаються вглиб кімнати, вдаряючись у контрольну панель спостереження на відстані не більше 10 футів (3 м) від вікна на висоті не більше 2 футів (0,6 м.) над підлогою.
5	Низький	Високий	Повне руйнування віконної системи (скло вилітає разом із рамою або масивом). Осколки потрапляють у простір, вдаряючись у вертикальну панель спостереження на відстані не більше 10 футів (3 м) від вікна на висоті понад 2 фути (0,6 м) над підлогою.

Підсумовуючи аналіз європейських та американських стандартів, а також фізико-механічних властивостей вікон, для комплексної оцінки критерію y_5 «Стійкість до вибухової хвилі» виокремлено три визначальні фактори X_{51} , X_{52} , X_{53} які графічно представлено на рис. 2.12.

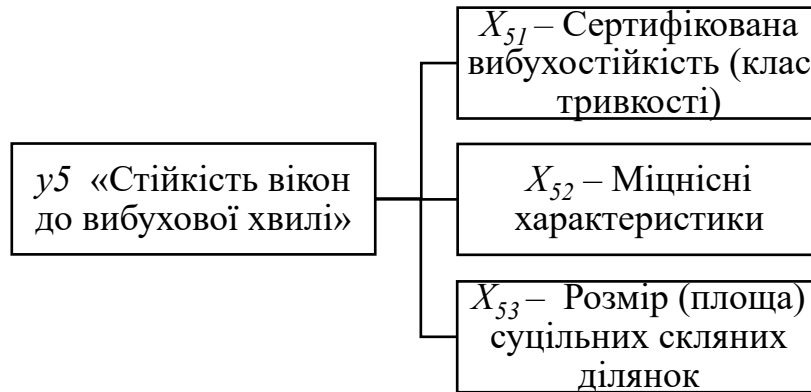


Рисунок 2.12 – Фактори, що визначають критерій y_5 «Стійкість до вибухової хвилі»

Характеристика факторів X_{51} , X_{52} , X_{53} :

- X_{51} Сертифікована вибухостійкість (клас тривкості) згідно з ДСТУ [10, 11]. Наявність у віконного блоку підтвердженого класу тривкості до вибуху (EXR1 – EXR5) забезпечується спеціалізованою надміцною конструкцією профілю, багатошаровим склом та особливими методами анкерування. Підтверджується виключно сертифікатом виробника за результатами натурних полігонних випробувань.
- X_{52} Міцнісні характеристики. Комплексна несуча здатність рами, вузлів кріплення (анкерування) та стійкість скління (використання термозміцненого, загартованого, ламінованого скла класів P3A – P5A) визначають на рівні матеріалів та компонентів. Рівень характеристик міцності оцінюється як:
 - *низький* – профіль та склопакет мають базові (стандартні) характеристики.
 - *середній* – профіль і склопакет мають покращені характеристики (наприклад, триплекс), але вікно не має сертифікованого класу захисту від злому (RC).
 - *високий* – вікно має сертифікований клас протизламності RC2, RC2N або RC3, що, забезпечує високу стійкість системи "рама-стулка-фурнітура" під час дії ударної хвилі.
- X_{53} Розмір (площа) суцільних скляних ділянок (шибок). Збільшення площі суцільного скління (шибок) експоненціально підви-

щує внутрішнє напруження в матеріалі та його схильність до руйнування від вибухових чи механічних впливів. Особливо критично цей фактор знижує загальну безпеку у панорамних вікнах та великогабаритних фасадних конструкціях порівняно зі стандартними вікнами, розділеними імпостами.

Для інтегральної оцінки критерію у5 «Стійкість до вибухової хвилі» було сформовано п'ятирівневу шкалу (від А до Е) на основі проаналізованих стандартів безпеки та комбінації описаних факторів X_{51} , X_{52} , X_{53} , градацію якої наведено у табл. 2.13.

Таблиця 2.13 – Оцінка рівню критерія у5 за факторами X_{51} , X_{52} , X_{53}

Рівень стійкості/ Оцінка критерію у5	Характеристика за факторами X_{51} , X_{52} , X_{53}
1	2
А/Спеціалізований (максимальний)	Вікно спеціально розроблено для використання в умовах високої ймовірності воєнних або терористичних загроз. Має посилену конструкцію, відповідає вимогам ДСТУ, має підтверджений клас вибухостійкості (EXR1–EXR5) (X_{51}).
В/Високий	Вікно характеризується підтвердженим класом зламостійкості не нижче RC2/RC2N або RC3 (X_{52}). Конструкція (посилене армування, протизламна фурнітура, багатошарове захисне скло) ефективно протистоїть динамічним навантаженням і забезпечує створення безпечного простору в приміщенні без критичного розльоту уламків під час проходження вибухової хвилі.
С/Підвищений	Вікно має покращені міцнісні характеристики елементів (посилений профіль, ламіноване скління), але не має сертифікованого класу захисту. Компоненти вікна пропорційно міцні, розміри шибок не перевищують стандартних габаритів (X_{53}). Забезпечує відносно безпечний простір (у разі руйнування уламки утримуються плівкою або рамою).
Д /Низький	Підвищені міцнісні характеристики присутні лише в окремих елементах (наприклад, звичайне скло, але хороший профіль). Не забезпечує гарантованого створення безпечного простору: високий ризик розльоту уламків середньої небезпеки при дії ударної хвилі.

Продовження таблиці 2.13

1	2
Е /Мінімальний (відсутній)	Конструкція вікна не передбачає захисту від динамічних навантажень. Характеризується стандартною (базовою) міцністю профілю та використанням звичайного відпаленого скла. До цього рівня також належать великогабаритні (панорамні) вікна (X_{53}) без спеціального захисту, які при вибуху генерують максимальну кількість небезпечних уламків.

Висновки до розділу 2

Розроблено комплексну систему оцінювання віконних конструкцій, яка базується на п'яти критеріях (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5). Вона об'єднує традиційні показники – енергоефективність, архітектурна привабливість та функціональність, економічна доцільність, стійкість до злону, з важливим в умовах сьогодення безпековим фактором – стійкістю до дії вибухової хвилі.

Для забезпечення можливості математичного моделювання проведено формалізацію різнорідних технічних та експлуатаційних параметрів. Якісні та описові характеристики (види скла, конструкція профілю, характер руйнування) переведено у дискретні оціночні рівні (шкали формалізації, наприклад, від А до Е), що дозволяє використовувати їх у подальших розрахунках.

Формалізація критерію стійкості до вибухової хвилі y_5 здійснена на основі перехресного аналізу провідних світових нормативів (UFC, GSA-TS01, ASTM, ISO). Доведено, що визначальними факторами для розрахунку цього критерію є наявність сертифікованого класу вибухостійкості (X_{51}), загальні міцнісні характеристики конструкції (X_{52}) та площа суцільного скління (X_{53}).

Здійснено ієрархічну структурування та формалізацію всіх критеріїв, для формування необхідного і достатнього інформаційного простору (матриці вхідних даних) для вибору раціонального варіанту віконної конструкції. Це створює наукове та практичне підґрунтя для застосування методів багатокритеріальної оптимізації з метою вибору найбільш раціонального варіанта віконної конструкції на етапі проектування чи реконструкції будівель.

3 МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОГО ФАКТОРА

3.1 Інтегральний критерій прийняття рішень

Вважатимемо, що відома (допустима для даного об'єкта) множина m варіантів віконних конструкцій: V_1, V_2, \dots, V_m , серед яких потрібно обрати один, який найкраще відповідає одночасно усім критеріям: енергоефективності, архітектурно-естетичним вимогам, вартості, рівню захисту від злому та стійкості до вибухової хвилі. У термінах теорії прийняття рішень варіанти віконних конструкцій V_1, V_2, \dots, V_m назвемо альтернативами, а обраний варіант – рішенням. Рішення позначимо символом D .

Припустимо, що кожна з розглянутих альтернатив апіорі задовольняє усі базові нормативні вимоги щодо проектування світлопрозорих конструкцій відповідно до чинних ДБН. При цьому задача прийняття рішень не є тривіальною, оскільки відсутня строго домінуюча альтернатива, яка б перевершувала інші за усіма критеріями одночасно. Кожна альтернатива має переваги за певною підмножиною частинних критеріїв і поступається за іншою. Таким чином, усі альтернативи перебувають у зоні компромісу, а вибір найкращого рішення залежить від відносної важливості (вагових коефіцієнтів) частинних критеріїв та ступенем виявлених переваг.

Для забезпечення порівнянності критеріїв різної розмірності та одиниць вимірювання доцільно провести нормування значень кожного частинного критерію на єдиний безрозмірний інтервал, наприклад $[0, 10]$. Оскільки розглядається задача вибору, а не абсолютного оцінювання альтернатив, достатньо, щоб пронормовані критерії відображали відносну перевагу альтернативи над іншими.

Пронормовані значення частинних критеріїв для кожної альтернативи позначимо таким чином:

Y_1 – рівень енергоефективності;

Y_2 – рівень архітектурної привабливості та функціональності ;

Y_3 – ціновий рівень (економічна ефективність);

Y_4 – рівень захисту від злому;

Y_5 – рівень стійкості до вибухової хвилі.

Чим вище значення пронормованого частинного критерію, тим сильніша перевага відповідної альтернативи за даним показником порівняно з іншими.

Оскільки всі альтернативи перебувають у зоні компромісу, для обґрунтованого вибору найкращої з них пропонується використовувати модель прийняття рішення на основі інтегрального критерію. Як рішення обирається альтернатива, що має найбільше значенням інтегрального критерію Y :

$$D = \arg \max(Y(V_1), Y(V_2) \dots Y(V_m)). \quad (3.1)$$

У якості інтегрального критерію пропонується зважена сума пронормованих частинних критеріїв:

$$Y = w_1 Y_1 + w_2 Y_2 + w_3 Y_3 + w_4 Y_4 + w_5 Y_5, \quad (3.2)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – коефіцієнти відносної важливості відповідних частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 .

Коефіцієнт важливості w_j ($j = 1, \dots, 5$) є число з інтервалу $(0, 1)$, що відображує ступінь впливу j -го частинного критерію на прийняття рішення. Чим більше значення вагового коефіцієнта, тим вища пріоритетність даного частинного критерію.

Для забезпечення коректності моделі, відповідно до правил регуляризації, вводиться обмеження нормування вагових коефіцієнтів:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1. \quad (3.3)$$

За таких умов інтегральний критерій Y також набуває значень як частинні критерії, у інтервалі $[0, 10]$, що спрощує інтерпретацію результатів.

Прийняттю рішення за формулою (3.1) передує етап визначення пронормованих значень частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 для кожної альтернативи та встановлення коефіцієнтів їх відносної важливості w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 . Для отримання цих величин пропонується використовувати метод парних порівнянь Сааті.

3.2 Оцінювання частинних критеріїв методом парних порівнянь Сааті

Запропонована модель прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій (3.2) є лінійною відносно пронормованих частинних критеріїв. Це означає, що зміна значення якогось частинного критерію на одну одиницю від будь-якого початкового значення призводить до однакової за величиною зміни інтегрального критерію. Наприклад, якщо у альтернативи оцінка за критерієм Y_1 змінилася з 0 до 1, або з 4 до 5, або з 9 до 10, то ефект від цих змін має однаковий вплив на значення інтегрального критерію.

Однак оцінювання енергоефективності здійснюється за шкалою щодо саме рівня енергоефективності (див. підр. 2.2), а не впливу його на прийняття рішення щодо вибору віконної конструкції. Тому, потрібне правило нелінійної трансформації $y_1 \rightarrow Y_1$, нелінійного перетворення шкали енергоефективності $A + +, A+, A, B, C$ на інтервал $[0, 10]$. Аналізована задача прийняття рішень є новою, тому проблематично визначити таке формальне відображення, яке було б достовірним за усіх комбінацій факторів.

Оцінювання значень критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 для альтернатив V_1, V_2, \dots, V_m пропонується здійснити за методом парних порівнянь Сааті. Воно здійснюється експертно на підставі інформації про значення критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 . Цей метод дозволяє експерту враховувати не лише кількісні характеристики альтернатив, але й слабоформалізовану інформацію про призначення будівельного об'єкта, цільову аудиторію та політику забудовника.

Оцінювання альтернатив V_1, V_2, \dots, V_m за кожним із критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 відбувається незалежно. Тому подальший виклад виконаємо для одного довільного критерію Y_1 , а для решти критеріїв процедура буде ідентичною (відрізняючись лише індексом).

Експерт на підставі попередньо зібраної інформації про досліджувані альтернативи $y_1(V_1), y_1(V_2), \dots, y_1(V_m)$ попарно визначає ступінь переваги однієї альтернативи над іншою. Для експерта виконання таких парних порівнянь є значно простішим та зручнішим завданням, ніж приписувати кожному значенню критерію y_1 відповідне значення критерію Y_1 із дотриманням лінійності ефекту на інтегральний критерій Y .

Експерт спочатку обирає яка із альтернатив в парі є кращою, і лінгвістично оцінює рівень її переваги з використанням класичної дев'ятибальної шкали Сааті [76]:

- 1 – перевага відсутня (альтернативи рівновагом);
- 2 – ледь слабка перевага (проміжне значення);

- 3 – слабка перевага;
- 4 – майже помірна перевага (проміжне значення);
- 5 – помірна (суттєва) перевага;
- 6 – майже явна перевага (проміжне значення) ;
- 7 – явна (значна) перевага;
- 8 – майже абсолютна перевага (проміжне значення).
- 9 – абсолютна перевага.

Після того, як експерт оцінив рівень переваг для кожної пари альтернатив, формується квадратна обернено-симетрична матриця парних порівнянь:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

де a_{ij} – рівень переваги альтернативи V_i над альтернативою V_j (де $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m,$) при чому виконується властивість оберненої симетричності: $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ та $a_{ij} = 1$ – елементи на головній діагоналі

Наступним кроком на основі побудованої матриці здійснюється узагальнення початкових лінгвістичних оцінок шляхом їхньої трансформації у кількісні (вагові) значення $Y_1(V_1), Y_1(V_2), \dots, Y_1(V_m)$. Математично, ця процедура полягає в знаходженні власного вектора \mathbf{S} і максимального власного значення λ_{max} матриці парних порівнянь:

$$\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{S} = \lambda_{max} \cdot \mathbf{S}. \quad (3.5)$$

Координати власного вектора відображають шукані відносні пріоритети, але для приведення до необхідної шкали $[0, 10]$ їх потрібно про- нормувати за такою загальною формулою:

$$\begin{aligned} Y_1(V_1) &= 10 \cdot \frac{S_1}{S_1 + S_2 + \dots + S_m}; \\ Y_1(V_2) &= 10 \cdot \frac{S_2}{S_1 + S_2 + \dots + S_m}; \\ &\dots\dots\dots \\ Y_1(V_m) &= 10 \cdot \frac{S_m}{S_1 + S_2 + \dots + S_m}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

де $S_1 \dots \dots \dots S_m$ – координати власного вектора S .

Кількість необхідних парних порівнянь залежить від кількості альтернатив: для трьох альтернатив (коли $m = 3$) потрібні 3 парні порівняння, для чотирьох альтернатив ($m = 4$) – 6 порівнянь, для п'яти ($m = 5$) – 10 парних порівнянь. Із збільшенням кількості парних порівнянь знижується ризик того, що помилкове визначення рівня переваги для однієї з пар альтернатив суттєво спотворить результуючі значення. Така стійкість до викидів (аномальних оцінок) математично закладена у процедурі знаходження головного власного вектора матриці. Окрім того, рівень узгодженості парних експертних порівнянь у матриці (3.4) можна перевірити за допомогою максимального власного значення λ_{max} . Якщо значення λ_{max} приблизно дорівнює кількості альтернатив m , тоді експертні оцінки вважаються належним чином узгодженими.

Приклад. Розглядаються чотири альтернативи V_1, V_2, V_3 та V_4 . Рівень енергоефективності альтернат є таким:

$$\begin{aligned} y_1(V_1) &= A + +; \\ y_1(V_2) &= A; \\ y_1(V_3) &= B; \\ y_1(V_4) &= C. \end{aligned}$$

Вважатимемо, що експертні оцінки рівня попарних переваг є такими:

- майже помірна перевага V_1 над V_2 ;*
- помірна перевага V_1 над V_3 ;*
- явна перевага V_1 над V_4 ;*
- майже помірна перевага V_2 над V_3 ;*
- помірна перевага V_2 над V_4 ;*
- слабка перевага V_3 над V_4 .*

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця експертних оцінок:

$$A_1 = \begin{array}{c} \left\| \begin{array}{cccc} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ 1 & 4 & 5 & 7 \\ 1/4 & 1 & 4 & 5 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{array} \right\| \begin{array}{l} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.903; 0.391; 0.16; 0.08).$$

Після нормування за формулою (3.6), отримуємо такі критеріальні значення Y_1 :

$$Y_1(V_1) = 10 \cdot (0.903 / 1.534) \approx 5.88;$$

$$Y_1(V_2) = 10 \cdot (0.391 / 1.534) \approx 2.55;$$

$$Y_1(V_3) = 10 \cdot (0.16 / 1.534) \approx 1.04;$$

$$Y_1(V_4) = 10 \cdot (0.08 / 1.534) \approx 0.52.$$

Власне максимальне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 4.24$. Воно є близьким до кількості альтернатив ($m = 4$). Це означає, що парні порівняння узгоджені між собою, тому результат оцінювання критеріальних значень альтернатив є достовірними.

3.3 Двоетапний підхід до визначення вагових коефіцієнтів критеріїв

Процес прийняття рішень здійснюється на основі інтегральної формули (3.2), яка містить п'ять вагових коефіцієнтів w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 . Чотири з них відображають важливість традиційних експлуатаційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 , а п'ятий ваговий коефіцієнт враховує важливість безпекового критерію Y_5 – рівню стійкості до вибухової хвилі.

Важливість безпекового критерію є варіативною, вона суттєво залежить від зовнішніх факторів (наприклад, наближеності об'єкта до лінії фронту, зони потенційних бойових дій або об'єктів критичної чи військової інфраструктури, що є імовірними цілями ворожих атак). Натомість важливість решти (традиційних) критеріїв залишається відносно стабільною.

Для вирішення цієї задачі пропонується двоетапна процедура розподілу важливості коефіцієнтів.

На першому етапі визначається важливість винятково для чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 (за умови абстрагування від безпекового фактора). При цьому сума їхніх попередніх вагових коефіцієнтів має дорівнювати одиниці:

$$w_1^n + w_2^n + w_3^n + w_4^n = 1, \quad (3.7)$$

де $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ – початкові вагові коефіцієнти відповідних традиційних критеріїв на першому етапі розрахунку.

На другому етапі визначається важливість безпекового критерію (стійкості до вибухової хвилі Y_5) та, відповідно, оцінюється його ваговий коефіцієнт. На основі визначеного значення w_5 , початкові вагові коефіцієнти чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 перенормовуються, таким чином, щоб загальна сума усіх п'яти коефіцієнтів дорівнювала одиниці (згідно з базовою умовою 3.3). Нормування здійснюємо за такими залежностями:

$$\begin{aligned} w_1 &= w_1^n \cdot (1 - w_5); \\ w_2 &= w_2^n \cdot (1 - w_5); \\ w_3 &= w_3^n \cdot (1 - w_5); \\ w_4 &= w_4^n \cdot (1 - w_5) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Запропонований двоетапний підхід дозволяє швидко адаптувати базові попередньо визначені вагові коефіцієнти традиційних критеріїв відповідно до поточних безпекових ризиків. При цьому пропорційне співвідношення вагомостей між самими традиційними критеріями повністю зберігається.

3.4 Обґрунтування вагових коефіцієнтів традиційних критеріїв вибору віконних конструкцій за класами об'єктів нерухомості

Визначення вагових коефіцієнтів $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 доцільно провести за методом парних порівнянь Т. Сааті. Даний підхід базується на процедурі попарного порівняння важливості показників, аналогічно до методики оцінювання частинних критеріїв альтернатив, наведеної у підрозділі 3.2. Процес передбачає експертне оцінювання переваг одного критерію над іншим за дев'ятибальною шкалою інтенсивності супровідних лінгвістичних термінів. Результатом порівняння є формування матриці парних порівнянь, на основі якої шляхом знаходження власного вектора розраховуються нормовані значення вагових коефіцієнтів.

У сучасній практиці зведення багатопверхових об'єктів девелоперами застосовується класифікація новобудов за рівнем комфортності. Попри відсутність закріпленої нормативно-правової градації, розподіл на сегменти («економ-клас», «комфорт-клас», «бізнес-клас» та «преміум-клас») здійснюється за сукупністю ознак: локацією, техніко-експлуатаційними характеристиками будівлі, параметрами прибудинкової

території, розвиненістю соціальної інфраструктури та наявністю інтелектуальних систем управління («розумний будинок») [81]. У межах даного дослідження категорії «бізнес-клас» та «преміум-клас» інтегровано у спільну групу «еліт-клас». Таке узагальнення обґрунтоване тим, що розбіжності між ними переважно стосуються ексклюзивних характеристик об'єктів, які не мають суттєвого впливу на процес прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій.

Різний рівень цін, платоспроможності замовників та очікувань щодо якості в цих сегментах зумовлює необхідність врахування класу комфортності будівлі при моделюванні багатокритеріального вибору віконних конструкцій. У зв'язку з цим при визначенні співвідношень важливості традиційних критеріїв розглянуто три основні класи багатопверхових будівель: «економ-клас», «комфорт-клас» та «еліт-клас». Для верифікації співвідношень важливості традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 було залучено експертів у сфері нерухомості, на основі оцінок яких сформовано рейтингові списки та матриці парних порівнянь для кожного класу будівель.

Для будівель «*економ-класу*» рейтинговий список традиційних критеріїв : має такий вигляд

Y_3 – ціновий рівень;

Y_1 – рівень енергоефективності;

Y_2 – рівень архітектурної привабливості та функціональності ;

Y_4 – рівень захисту від злону.

Експертні оцінки рівня попарних переваг є такими:

(2) *ледь слабка* перевага Y_3 над Y_1 ;

(4) *майже помірна* перевага Y_3 над Y_2 ;

(7) *явна* перевага Y_3 над Y_4 ;

(3) *слабка* перевага Y_1 над Y_2 ;

(5) *помірна* перевага Y_1 над Y_4 ;

(4) *майже помірна* перевага Y_2 над Y_4 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A_{\text{Економ}} = \begin{matrix} & Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ \begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 & 1/2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/4 & 4 \\ 2 & 4 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/4 & 1/7 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.503, 0.235, 0.827, 0.089).$$

Після нормування отримуємо такі значення вагових коефіцієнтів:

$$w_1^n = 0.31, w_2^n = 0.14, w_3^n = 0.50, w_4^n = 0.05.$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 4.1$. є близьким до кількості критеріїв, що свідчить про достатню узгодженість суджень експерта. Отже, результати оцінювання важливості традиційних критеріїв для будівель «економ-класу» є достовірними.

Для будівель «**комфорт-класу**» рейтинговий список традиційних критеріїв такий:

Y_1 – рівень енергоефективності;

Y_2 – рівень архітектурної привабливості та функціональності;

Y_3 – ціновий рівень;

Y_4 – рівень захисту від злону.

Експертні оцінки рівня попарних переваг такі:

(2) *ледь слабка* перевага Y_1 над Y_2 ;

(3) *слабка* перевага Y_1 над Y_3 ;

(5) *помірна* перевага Y_1 над Y_4 ;

(2) *ледь слабка* перевага Y_2 над Y_3 ;

(4) *майже помірна* перевага Y_2 над Y_4 ;

(4) *майже помірна* перевага Y_3 над Y_4 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A_{\text{комфорт}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \end{array} \\ \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1/4 & 1 \end{array} \right\| \begin{array}{l} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.807, 0.485, 0.316, 0.117).$$

Після нормування отримуємо такі значення вагових коефіцієнтів:

$$w_1^n = 0.47, w_2^n = 0.28, w_3^n = 0.18, w_4^n = 0.07.$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 4.09$ є близьким до кількості критеріїв, що свідчить про достатню узгодженість суджень експерта. Отже, результати оцінювання важливості традиційних критеріїв для будівель «комфорт-класу» є достовірними.

Для будівель «еліт-класу» рейтинговий список традиційних критеріїв є таким:

Y_2 – рівень архітектурної привабливості та функціональності ;

Y_4 – рівень захисту від злому;

Y_1 – рівень енергоефективності;

Y_3 – ціновий рівень.

Експертні оцінки рівня попарних переваг є такими:

(3) *слабка* перевага Y_2 над Y_4 ;

(4) *майже помірна* перевага Y_2 над Y_1 ;

(8) *майже абсолютна* перевага Y_2 над Y_3 ;

(2) *ледь слабка* перевага Y_4 над Y_1 ;

(6) *майже явна* перевага Y_4 над Y_3 ;

(5) *помірна* перевага Y_1 над Y_3 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A_{\text{Еліт}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ \begin{array}{c} \left\| \right. \\ \left. \right\| \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 4 \\ 1/5 \\ 2 \end{array} & \begin{array}{c} 1/4 \\ 1 \\ 1/8 \\ 1/3 \end{array} & \begin{array}{c} 5 \\ 8 \\ 1 \\ 6 \end{array} & \begin{array}{c} 1/2 \\ 3 \\ 1/6 \\ 1 \end{array} \\ & \begin{array}{c} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{array} \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.2493, 0.8822, 0.0723, 0.3928).$$

Після нормування отримуємо такі значення вагових коефіцієнтів:

$$w_1^n = 0.16, \quad w_2^n = 0.55, \quad w_3^n = 0.05, \quad w_4^n = 0.24.$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 4.1$. Воно є близьким до кількості критеріїв, що свідчить про достатню узгодженість суджень експерта. Отже, результати оцінювання важливості традиційних критеріїв для будівель «еліт-класу» є достовірними.

Вагові коефіцієнти чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 визначені на першому етапі моделювання для будівель різного класу комфортності наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Вагові коефіцієнти $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$

Клас комфортності будівлі	Вагові коефіцієнти			
	w_1^n	w_2^n	w_3^n	w_4^n
Економ класу	0.31	0.14	0.50	0.05
Комфорт-класу	0.47	0.28	0.18	0.07
Еліт - класу	0.16	0.55	0.05	0.24

Порівняння вагових коефіцієнтів $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 , що визначені на першому етапі моделювання представлено на рис. 3.1.

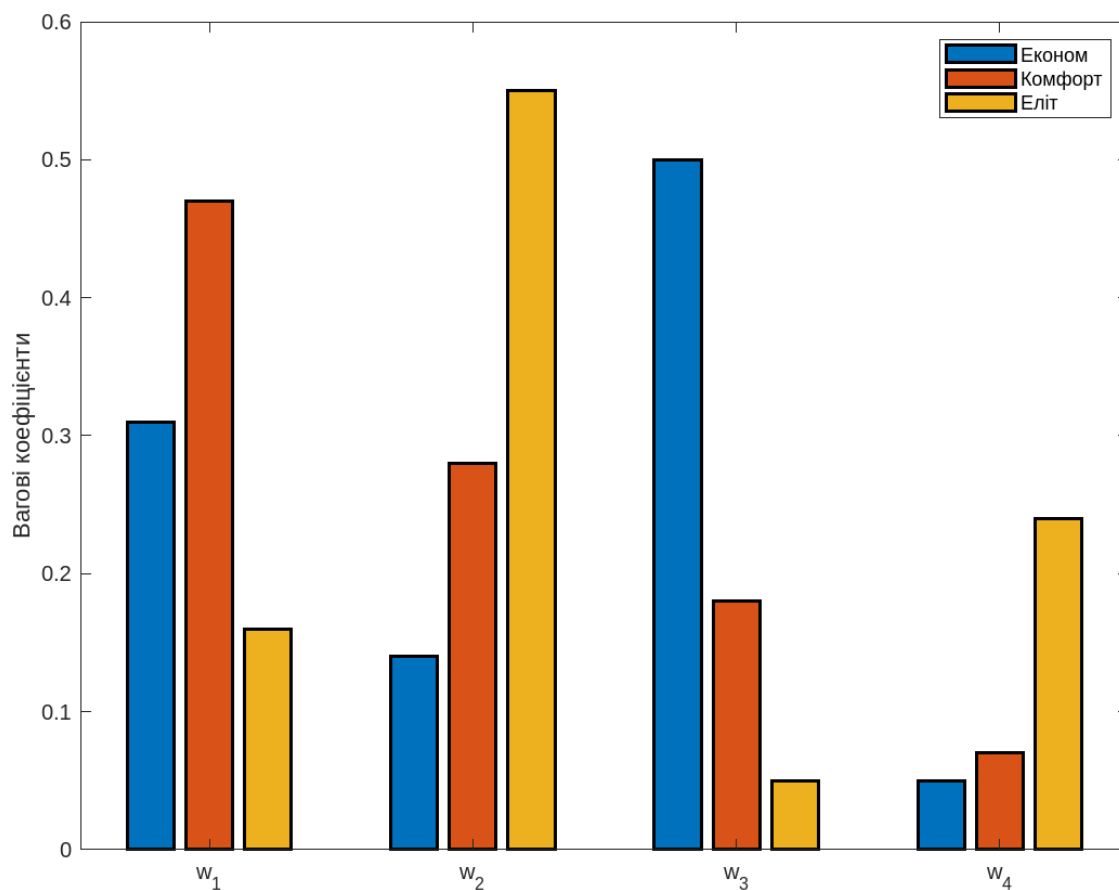


Рисунок 3.1 – Порівняння розподілу важливостей критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 на першому етапі моделювання

Порівняльний аналіз пріоритетів вибору віконних конструкцій для різних різного класу комфортності житлових будівель демонструє, що для будівель «економ-класу» (синій колір на рис. 3.1) доміантним критерієм є ціновий рівень Y_3 , при тому критерії Y_2 та Y_4 мають мінімальне значення, що вказує на низьку чутливість замовників цього сегмента до додаткових характеристик віконних систем. Сегмент «комфорт-класу» демонструє найбільш збалансований розподіл між основними критеріями, але доміантним критерієм є Y_1 енергоефективність, притому вага критерію Y_3 (ціновий рівень) значно нижча, ніж в економ-класі. У сегменті «еліт - класу» спостерігається зміна пріоритетів порівняно з іншими класами, ексклюзивні параметри або підвищені вимоги до безпеки/комfortу мають більш вагоме значення, де вартість не є визначальним фактором вибору.

З графіку (рис. 3.1) видно, що жоден із критеріїв не є однаково важливим для всіх трьох класів, що підтверджує правильність обраної методики групування.

3.5 Математичне моделювання впливу безпекових ризиків на вибір віконних систем

Математичне моделювання пріоритетності вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекових ризиків потребує інтеграції безпекового критерію Y_5 (стійкість системи до впливу повітряної ударної хвилі). Оцінювання важливості безпекового критерію під час вибору віконних конструкцій реалізується через визначення коефіцієнта вагомості w_5 .

Параметри зон ураження об'єктів під час вибуху детермінуються значеннями надлишкового тиску та імпульсу вибуху, рівень стійкості конструкції розраховується на основі міцнісних характеристик скла, жорсткості рами, площі застакнення та параметрів анкерування (викладено у підрозділі 2.6). Трансформація підходів до проектування та реконструкції будівель в умовах воєнних загроз зумовлює необхідність визначення вагомості безпекового критерію w_5 через оцінювання ризиків пошкодження конструкцій внаслідок бойових дій. Такий підхід базується на аналізі просторового розташування об'єкта та його інфраструктурного оточення, що дозволяє забезпечити перехід від суб'єктивних експертних оцінок до об'єктивних розрахункових показників. Використання геопросторової аналітики та врахування інфраструктурних ризиків є основою для математичного обґрунтування моделі вибору.

Відповідно, коефіцієнт важливості зазначеного критерію пропонується розрахувати за наступною залежністю:

$$w_5 = w_{51} + w_{52} + w_{53}, \quad (3.9)$$

де w_{51} – коефіцієнт, що враховує віддаленість будівлі від зони бойових дій;

w_{52} – коефіцієнт, що враховує віддаленість будівлі від об'єктів можливих ракетно-бомбових атак – військових частин, об'єктів військово-промислового комплексу, аеродромів, електростанцій, нафтобаз та інших інфраструктурних об'єктів;

w_{53} – коефіцієнт, що враховує кількість об'єктів можливих ракетно-бомбових атак навколо будівлі.

Граничне (максимальне) значення коефіцієнта w_5 обмежено на рівні 0.55, що відповідає максимальному значенню вагового коефіцієнта одного з традиційних критеріїв а саме, w_2^n коефіцієнта вагомості рівня критерія енергоефективності Y_2 (під час прийняття рішень щодо вибору вікон для будівель еліт-класу). Нижній рівень значення коефіцієнта w_5 прийнято рівним 0.05 за аналогією з мінімальними значеннями вагових коефіцієнтів традиційних критеріїв (табл. 3.1). Сумарний внесок від коефіцієнтів w_{51}, w_{52}, w_{53} знаходиться в інтервалі [0.05, 0.55].

Співвідношення між коефіцієнтами w_{51}, w_{52}, w_{53} у загальному результаті коефіцієнта w_5 можна оцінити за парними порівняннями. Для приведення розрахованих значень компонентів власного вектора матриці парних порівнянь до визначених меж здійснюється процедура лінійного нормування, що дозволяє пропорційно розподілити вагомість компонентів у заданому діапазоні із збереженням їхньої ієрархічної значущості.

Експертні оцінки рівня парних порівнянь коефіцієнтів w_{51}, w_{52}, w_{53} , що визначено на основі аналізу (підрозділі 2.6) та експертних оцінок провідних фахівців у сфері проектування є такими:

явна перевага w_{51} над w_{53} ;

помірна перевага w_{51} над w_{52} ;

слабка перевага w_{52} над w_{53} .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A_{w_5} = \begin{array}{c} \left\| \begin{array}{ccc} w_{51} & w_{52} & w_{53} \\ 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{array} \right\| \begin{array}{l} w_{51} \\ w_{52} \\ w_{53} \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює

$$S = (0.963, 0.248, 0.107).$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 3.07$ свідчить про достатню узгодженість суджень експертної оцінки. Після нормування отримуємо такі максимально-можливі значення коефіцієнтів:

$$w_{51} = 0.4, w_{52} = 0.1, w_{53} = 0.05.$$

Для оцінювання коефіцієнту w_{51} запропоновано територіальну типологізацію за рівнем потенційної загрози (зонування за рівнем воєнної небезпеки), що наведена на рис. 3.2. [49]. Ця схема класифікує зони проживання та економічної діяльності залежно від їхньої віддаленості від лінії фронту або небезпечних ділянок державного кордону. Запропоноване зонування включає п'ять основних рівнів небезпеки, кожен з яких характеризується специфічними ризиками ураження, ступенем обмеження економічної активності та вимогами до безпеки інженерних рішень.



Рисунок 3.2 – Схема зонування територій за рівнем регіональної безпеки [49]

Рейтинговий список макрорегіонів стосовно важливості w_{51} є таким:

R_1 – Рубіж;

R_2 – Фронтир;

R_3 – Опора;

R_4 – Тил.

Експертні оцінки рівня попарних переваг є такими:

(3) *слабка* перевага R_1 над R_2 ;

(6) *майже явна* перевага R_1 над R_3 ;

(9) *абсолютна* перевага R_1 над R_4 ;

(5) *помірна* перевага R_2 над R_3 ;

(6) *майже явна* перевага R_2 над R_4 ;

(5) *помірна* перевага R_3 над R_4 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A_{w_{51}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \\ \begin{array}{c} \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 1/3 \\ 1/6 \\ 1/9 \end{array} & \begin{array}{c} 3 \\ 1 \\ 1/5 \\ 1/6 \end{array} & \begin{array}{c} 6 \\ 5 \\ 1 \\ 1/5 \end{array} & \begin{array}{c} 9 \\ 6 \\ 5 \\ 1 \end{array} \\ & \begin{array}{c} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{array} \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.7699, 0.5971, 0.2120, 0.0765).$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 3.97$. Воно є близьким до 4 – до кількості критеріїв. Це означає, що парні порівняння узгоджені між собою, тому результат оцінювання є достовірними. Після нормування власного вектора на інтервал $[0.05 \ 0.4]$, отримуємо такі значення:

$$w_{51}(R_1, \text{Рубіж}) = 0.4;$$

$$w_{51}(R_2, \text{Фронтир}) = 0.31;$$

$$w_{51}(R_3, \text{Опора}) = 0.11;$$

$$w_{51}(R_4, \text{Тил}) = 0.05.$$

Для оцінювання коефіцієнта w_{52} – віддаленість від потенційних цілей ракетно-бомбових атак, розглядається наявність поблизу

об'єктів, що мають потенційне стратегічне значення та будівель з вибухопожежонебезпечними виробництвами категорії А, Б згідно ДСТУ [81]. До об'єктів потенційного стратегічного значення належать:

1. Військові об'єкти (військові частини, військові бази, об'єкти оборони, підприємства воєнно-промислового комплексу, стратегічні комунікації).
2. Об'єкти критичної інфраструктури (електростанції, водозабори, нафтові та газові термінали, трубопроводи, енергетичні об'єкти).
3. Економічно важливі об'єкти (промислові зони, торговельні порти, аеропорти).
4. Об'єкти інформаційної та технологічної інфраструктури (центри обробки даних, дослідницькі центри, ключові технологічні підприємства).

Розташування таких об'єктів поблизу житлової будівлі збільшує вагомість критерію стійкість до вибухової хвилі. Для визначення близькості розташування проаналізовано державні будівельні норми ДБН Б.2.2-12:2019 [82], які встановлюють протипожежні відстані від житлових будівель до об'єктів різного призначення (від 6 м до 300 м і більше). Зокрема, мінімальна відстань до спеціалізованих морських, річкових портів становить 300 м, до резервуарів легкозаймистих і горючих рідин І категорії – 200 м, до автовокзалів – 100 м тощо.

На основі проведеного в підрозділі 2.6 аналізу дії ударної хвилі визначено, що руйнування звичайного скління починається при надлишковому тиску $\Delta P \approx 2$ кПа (часткове руйнування ≥ 10 %), а повне руйнування – при $\Delta P \approx 7$ кПа, виділено такі зони небезпеки сусідства:

- зона значної небезпеки сусідства (відстань до потенційних цілей ≤ 300 м): $w_{52} = 0.10$;
- зона середньої небезпеки сусідства (відстань до потенційних цілей у діапазоні [300; 700] м): $w_{52} = 0.05$;
- за відсутності потенційних цілей в межах 700 м: $w_{52} = 0.0$.

Ширину зон обрано з урахуванням руйнівної дії вибухової хвилі, та ймовірної точності ураження цілі.

Якщо поруч із будівлею розташовано кілька можливих цілей, рівень ризику зростає. Ці ризики враховується коефіцієнтом w_{53} наступним чином. Якщо в радіусі 500 м від будівлі розташовані дві або більше потенційних цілей то додатковий ризик враховується коефіцієнтом $w_{53} = 0.05$; в інших випадках $w_{53} = 0.0$.

Визначення вагових коефіцієнтів w_{51}, w_{52}, w_{53} для оцінки важливості критерію Y_5 наведено у зведеній табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вагові коефіцієнти w_{51}, w_{52}, w_{53}

Визначення коефіцієнту		Значення
Коефіцієнт	Умова визначення	
w_{51} коефіцієнт, що враховує віддаленість від зони бойових дій	R_1 , Рубіж	$w_{51}(R_1) = 0.40$
	R_2 , Фронтир	$w_{51}(R_2) = 0.31$
	R_3 , Опора	$w_{51}(R_3) = 0.11$
	R_4 , Тил	$w_{51}(R_4) = 0.05$
w_{52} коефіцієнт, що враховує віддаленість від об'єктів можливих ракетно-бомбових атак	відстань до потенційних цілей від будівлі ≤ 300 м	$w_{52} = 0.10$
	відстань до потенційних цілей від будівлі в межах 300 м - 700 м	$w_{52} = 0.05$
	потенційні цілі відсутні в межах 700м	$w_{52} = 0.0$
w_{53} коефіцієнт, що враховує кількість об'єктів можливих ракетно-бомбових атак навколо будівлі	в радіусі 500 м від будівлі розташовані дві або більше потенційних цілей	$w_{53} = 0.05$
	менше 2 потенційних цілей в радіусі 500 м від будівлі	$w_{53} = 0.0$

Зазначимо, що території в межах одного населеного пункту з однаковою оцінкою рівня безпеки ($w_{52} + w_{53}$), мають відповідно однакове значення показника w_5 . Такі території утворюють регіональний кластер безпеки. Під регіональним кластером безпеки розуміємо сукупність територій із однаковою оцінкою рівня безпеки. Фактично у межах міста може існувати до чотирьох регіональних кластерів безпеки, для яких сумарне значення ($w_{52} + w_{53}$) дорівнює 0; 0.05; 0.1 або 0.15.

Наприклад, в межах міста w_5 для об'єктів буде однаковим якщо:

$$w_{52} + w_{53} = 0.1 + 0.0 = 0.1;$$

або

$$w_{52} + w_{53} = 0.05 + 0.05 = 0.1.$$

Приклад двоетапного підходу до визначення вагових коефіцієнтів критерієв вибору віконних конструкцій.

Умова: будівля (комфорт- класу) розташована в місті Полтава. На відстані 400 метрів від неї знаходиться електрична підстанція, а на відстані 350 м – завод військово-промислового комплексу.

1. Будівля відноситься до комфорт-класу, відповідно вагові коефіцієнти чотирьох традиційних критеріїв визначеними на першому етапі (табл. 3.1), становлять :

$$w_1^n = 0.47, w_2^n = 0.28, w_3^n = 0.18, w_4^n = 0.07.$$

Визначення коефіцієнтів важливості w_5 критерія стійкості до дії вибухової хвилі Y_5 .

Місто Полтава входить у макрорегіон «Опора» (рис. 3.2), тому відповідно до табл. 3.2 маємо $w_{51} = 0.11$. Потенційні цілі розташовані в зоні середньої небезпеки сусідства (350 м та 400 м), тому $w_{52} = 0.05$. У межах 500-метрової зони знаходяться дві потенційні цілі тому $w_{53} = 0.05$. Згідно формули (3.9), обчислюємо коефіцієнт важливості:

$$w_5 = w_{51} + w_{52} + w_{53} = 0.11 + 0.05 + 0.05 = 0.21.$$

2. На основі отриманого значення w_5 початкові вагові коефіцієнти $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 підлягають перенормуванню таким чином, щоб сумарне значення всіх п'яти коефіцієнтів відповідало одиниці згідно з базовою умовою (3.3).

Сумарно на ці чотири вагові коефіцієнти повинні складати:

$$1 - w_5 = 1 - 0.21 = 0.79.$$

Після нормування вагових коефіцієнтів традиційних критеріїв за формулою (3.8) отримуємо такі значення:

$$w_1 = w_1^n \cdot (1 - w_5) = 0.47 \cdot (1 - 0.21) = 0.37;$$

$$w_2 = w_2^n \cdot (1 - w_5) = 0.28 \cdot (1 - 0.21) = 0.22;$$

$$w_3 = w_3^n \cdot (1 - w_5) = 0.18 \cdot (1 - 0.21) = 0.14;$$

$$w_4 = w_4^n \cdot (1 - w_5) = 0.07 \cdot (1 - 0.21) = 0.06$$

$$w_5 = 0.21.$$

3.6 Методика вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекових факторів

Вибір віконних конструкцій за запропонованим підходом здійснюється на етапі проектування, коли для конкретної будівлі або приміщення існує кілька можливих варіантів (альтернатив). Передбачається, що кожна з альтернатив відповідає вимогам ДБН до світлопрозорих конструкцій, і жодна з них не має безумовної переваги за всіма критеріями.

Прийняття рішення ґрунтується на оцінюванні формалізованих факторів впливу та аналізі критеріїв, що забезпечують збалансування архітектурних, енергоефективних, економічних і безпекових аспектів, визначених у розділі 2. Математичне обґрунтування реалізовано за допомогою розроблених моделей прийняття рішень (3.1) – (3.9). Структурну схему процесу вибору віконних конструкцій із урахуванням безпекової ситуації подано на рис. 3.3.

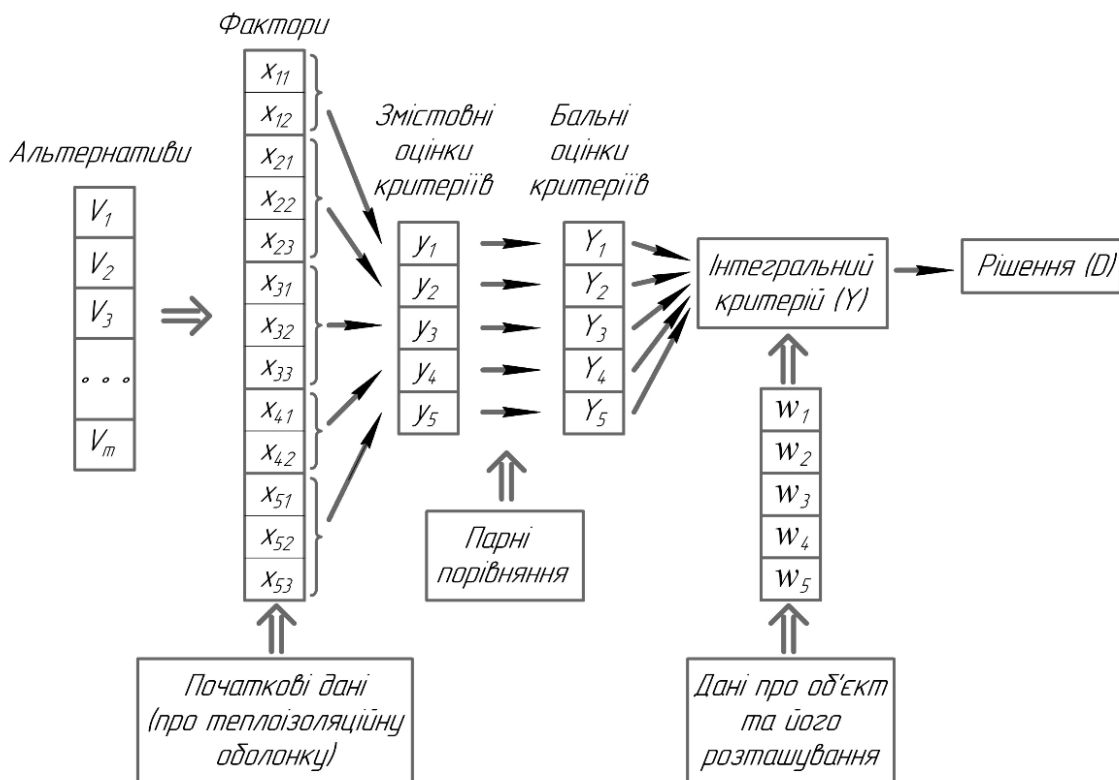


Рисунок 3.3 – Структурна схема багатокритеріального прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекової ситуації [20]

Структурна схема (рис. 3.3) алгоритмізує процес багатofакторного вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекових факторів, а саме:

- формування набору альтернатив;
- опис кожної альтернативи через фактори/показники;
- переведення показників у критерії (змістовні \rightarrow бальні);
- визначення ваг критеріїв через парні порівняння;
- розрахунок інтегрального (узагальненого) критерію;
- прийняття рішення про найкращий варіант.

Основні блоки структурної схеми:

1. Альтернативи (ліворуч) – це різні варіанти віконних конструкцій позначені як V_1, V_2, \dots, V_m .
2. Фактори (матриця X_i) – це кількісні або якісні характеристики кожної альтернативи. Кожен варіант із множини V_1, V_2, \dots, V_m характеризується набором факторів (показників).
3. Змістовні оцінки критеріїв \rightarrow Бальні оцінки критеріїв.

Фактори X_i перетворюються у два види оцінок: Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 – змістовні (якісні/кількісні) оцінки за критеріями, які за методом парних порівнянь переводяться в Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 – бальні значення критеріїв.

4. Коефіцієнти відносної важливості w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 для кожної альтернативи V_1, V_2, \dots, V_m визначаються двоетапним підходом.
5. Інтегральний критерій (Y) для кожної альтернативи V_1, V_2, \dots, V_m визначається як зважена сума бальних оцінок критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 та з урахуванням їх ваг w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 .
6. Рішення (D) – обирається як найбільше значенням інтегрального критерію (Y).

Розрахунки матриць парних порівнянь для моделі підтримки прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій можуть бути реалізовані у програмі Matlab.

3.7 Алгоритм вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекових факторів

Прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій з врахуванням безпекової ситуації проводиться за наступним алгоритмом:

Крок 1. Визначення вихідних даних: місто розташування об'єкта, архітектурні особливості, вимоги до будівлі та віконних конструкцій, клас комфортності будівлі («економ», «комфорт», «еліт»); термічний опір зовнішньої стіни, розміри її фрагмента для розрахунку приведенного термічного опору, а також наявність поблизу об'єктів критичної інфраструктури та підприємств військово-промислового комплексу.

Крок 2. Формування множини альтернатив $V1, V2, \dots, Vm$ – варіантів віконних конструкцій із зазначенням їх характеристик: габаритних розмірів, функціональних властивостей, опору теплопередачі, технічних характеристик (типу профілю та профільної системи, параметрів склопакета і його заповнення, фурнітури) та вартості, приклад наведено на рис. 3.4.

Rq - опір теплопередачі конструкції (для житлових, громадських будинків повинен відповідати ДБН: 0,9 для I темп. зони; 0,7 - для II). Rw - індекс звукоізоляції повітряного шуму, застосовується для діапазону частот 100-3150 Гц, розрахований на оцінку шумів побутового походження (розмовна мова, радіо, телевізор). Безшовне зварювання за замовчування у всіх типах LUVIN Premium V7 (усі кольори) та LUVIN Comfort V5 (ламіновані)

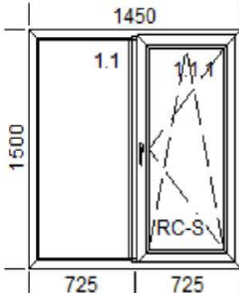
№ поз.: 2	Rw= 38,0	Rq= 1:0.74	шир. x вис., мм: 1450 x 1500	Ціна, грн.: 12323,00
			84,449 кг, кількість: 1 шт.	
				
Тип: LUVIN Comfort V5 Колір: Білий (чорний ущ.) Профіль: Veka SL70 Фурнітура: activPilot RC-start, зламостійка поворотно-відкидна Колір: Білий WS Ручка з ключем та кнопкою біла Спецпідбір: Мікрорентильяція (SBA.K.T) Заповнення: 4i-12Ar-4GE-14Ar-3.1.3 (1.1, 1.1.1)				
Додаткові профілі Підставочний профіль 30/37 мм з джгутом				шт мм 1 1450

Рисунок 3.4 – Характеристика вікна [49]

Крок 3. На основі характеристик альтернатив $V1, V2, \dots, Vm$ визначаються фактори: X_{11} – опір теплопередачі вікна; X_{12} – приведений термічний опір зовнішньої стіни будівлі (приміщення). За сукупністю показників X_{11}, X_{12} відповідно до рекомендацій табл. 2.3, здійснюється оцінювання частинного критерію $y1$ «Енергоефективність» для кожної альтернативи.

Крок 4. Виконується попарне порівняння альтернатив V_1, V_2, \dots, V_m за критерієм y_1 «Енергоефективність» із формуванням матриці парних порівнянь $A(Y_1)$ відповідно до формули (3.4). На основі отриманої матриці за формулами (3.5) та (3.6) визначаються бальні оцінки за критерієм Y_1 , що відповідають координатам власного вектора S цієї матриці. Для перевірки узгодженості матриці парних порівнянь $A(Y_1)$ розраховується максимальне власне значення λ_{max} та перевіряється умова його наближеності до кількості альтернатив. Приклад розрахунку власного вектора матриці парних порівнянь S та розрахунку власного значення матриці парних порівнянь λ_{max} у програмному комплексі *Matlab* наведено на рис. 3.5.

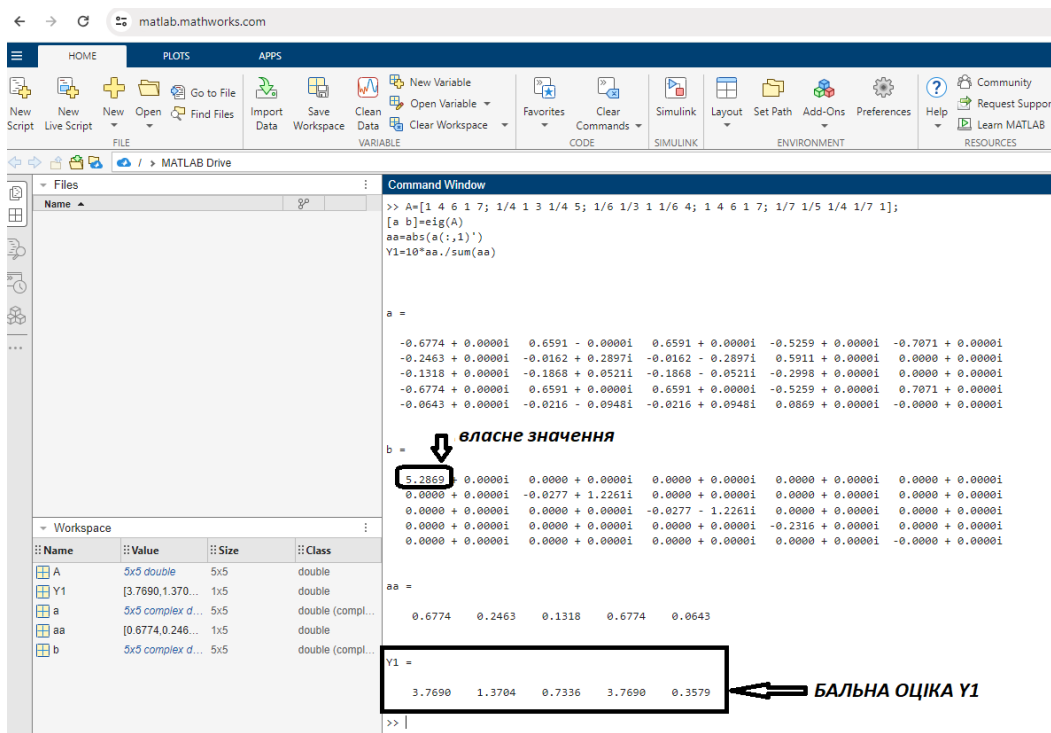


Рисунок 3.5 – Розрахунок матриці парних порівнянь п'яти альтернатив критерію Y_1 «Енергоефективність» у програмному комплексі *Matlab*.

Крок 5. На основі характеристик альтернатив V_1, V_2, \dots, V_m , відповідно до рекомендацій табл. 2.4, визначаються фактори: X_{21} – естетика та дизайн, X_{22} – характеристики профілю, профільної системи, склопакету; X_{23} – додаткові елементи та фурнітура.. За сукупністю показників X_{21}, X_{22}, X_{23} згідно з оцінюванням наведеним у табл. 2.5 встановлюється рівень критерію y_2 «Архітектурна привабливість і функціональність» для кожної альтернативи.

- Крок 6.* Здійснюється попарне порівняння альтернатив за критерієм «Архітектурна привабливість і функціональність» із формуванням матриці $A(Y_2)$. Визначаються бальні оцінки критерію Y_2 як координати власного вектора S матриці $A(Y_2)$ за формулою (3.6). Розраховується максимальне власне значення λ_{max} та перевіряється узгодженість матриці $A(Y_2)$.
- Крок 7.* На основі характеристик альтернатив $V1, V2, \dots, Vm$ відповідно до рекомендацій наведених у п. 2.4 для кожної альтернативи визначається рівень критерію $y3$ «Ринкова вартість», що враховує фактори: X_{31} – вартість базисних матеріалів та компонентів; X_{32} – конфігурація та складність (архітектурно-конструктивна) вікна, X_{33} – брендування, виробнича логістика та регіональні фактори.
- Крок 8.* Здійснюється попарне порівняння альтернатив за критерієм «Ринкова вартість» із формуванням матриці $A(Y_3)$. Визначаються бальні оцінки критерію Y_3 як координати власного вектора S матриці $A(Y_3)$ за формулою (3.6). Розраховується максимальне власне значення λ_{max} та перевіряється узгодженість матриці $A(Y_3)$.
- Крок 9.* На основі характеристик альтернатив $V1, V2, \dots, Vm$ відповідно до рекомендацій табл. 2.7 визначаються фактори: X_{41} – стійкість основних елементів вікна до злому (профілю, склопакету), X_{42} – наявність додаткових зламостійких елементів (фурнітури, протизламні пари). За сукупністю показників X_{41}, X_{42} відповідно до рекомендацій табл. 2.8, здійснюється оцінювання частинного критерію $y4$ «Захист від злому» для кожної альтернативи.
- Крок 10.* Здійснюється попарне порівняння альтернатив за критерієм «Захист від злому» із формуванням матриці $A(Y_4)$. Визначаються бальні оцінки критерію Y_4 як координати власного вектора S матриці $A(Y_4)$ за формулою (3.6). Розраховується максимальне власне значення λ_{max} та перевіряється узгодженість матриці $A(Y_4)$.
- Крок 11.* На основі характеристик альтернатив $V1, V2, \dots, Vm$ визначаються фактори: X_{51} – сертифікована вибухостійкість вікна (клас тривкості), X_{52} – міцнісні характеристики конструкції; X_{53} – розмір (площа) скляних ділянок (шибок). За сукупністю факторів X_{51}, X_{52}, X_{53} відповідно до рекомендацій табл. 2.13, здійснюється оцінювання частинного критерію $y5$ «Стійкість до вибухової хвилі» для кожної альтернативи.

Крок 12. Здійснюється попарне порівняння альтернатив за критерієм «Захист від злому» із формуванням матриці $A(Y_5)$. Визначаються бальні оцінки критерію Y_5 як координати власного вектора S матриці $A(Y_5)$ за формулою (3.6). Розраховується максимальне власне значення λ_{max} та перевіряється узгодженість матриці $A(Y_5)$.

Крок 13. Встановлюються вагові коефіцієнти $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 залежно до класу комфортності будівлі «економ-клас», «комфорт-клас», «еліт-клас» відповідно табл. 3.1

Крок 14. Визначається коефіцієнт важливості w_5 критерію Y_5 за формулою (3.9) з урахуванням складових w_{51}, w_{52}, w_{53} встановлених відповідно до табл. 3.2. Виконується перенормування вагових коефіцієнтів критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 з урахуванням w_5 за формулою (3.8) та визначаються вагові коефіцієнти w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 .

Крок 15. Для кожної альтернативи обчислюється інтегральний критерій $Y(V_1), Y(V_2) \dots Y(V_m)$ як зважена сума нормованих частинних критеріїв відповідно до формули (3.2).

Крок 16. Як рішення (D) обирається альтернатива з максимальним значенням інтегрального критерію $Y(V_1), Y(V_2) \dots Y(V_m)$ згідно з формулою (3.1).

Висновки до розділу 3

Розроблено модель та методику багатокритеріального вибору віконних конструкцій з обов'язковим урахуванням безпекового фактора.

Запропонована модель прийняття рішень базується на п'яти частинних критеріях. Чотири з них є традиційними і оцінюють: енергоефективність, архітектурну привабливість та функціональність, ринкову ціну, а також захист від злому. П'ятий критерій дозволяє кількісно оцінювати стійкість віконних конструкцій до дії вибухової хвилі.

Інтегральний критерій прийняття рішень являє собою лінійну згортку зважених частинних критеріїв. Для визначення вагових коефіцієнтів застосовано двоетапний підхід, що базується на методі парних по-

рівнянь, з подальшим обґрунтуванням ваг традиційних критеріїв залежно від класу об'єктів нерухомості. Крім того, розроблено математичну модель впливу безпекових ризиків на процес вибору віконних систем.

Запропоновані моделі і методика забезпечують комплексну, обґрунтовану та прозору оцінку альтернатив, дозволяючи враховувати як технічні, економічні та архітектурні аспекти, так і підвищені вимоги до безпеки віконних конструкцій.

Розроблені алгоритм і структурна схема багатокритеріального прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій з урахуванням безпекової ситуації спрощують практичну реалізацію запропонованого підходу. Завдяки цьому забезпечується прийняття науково -обґрунтованого рішення під час проєктування, реконструкції та модернізації будівель різного призначення.

4. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОГО ФАКТОРУ

4.1 Варіанти віконних конструкцій та вихідні дані

Для ілюстрації практичного застосування розробленої моделі та методики багатокритеріального вибору віконних конструкцій розглянемо приклад вибору вікна для житлової будівлі. Було сформовано п'ять альтернатив *V1*, *V2*, *V3*, *V4*, *V5*, які повністю відповідають нормативним вимогам і перебувають у зоні компромісних рішень..

Альтернатива *V1* – Металопластикова двостулкова віконна конструкція стандартного типу з акцентом на базову енергоефективність без додаткових підсилень безпеки з використання стандартного скла. Орієнтована на забезпечення нормативних показників теплоізоляції при мінімальних капіталовкладеннях Характеристики вікна представлено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд та технічні характеристики базової віконної конструкції (альтернатива *V1*) [84]

Профільна система: 5-камерний профіль завтовшки 72 мм (by Veka), що забезпечує високу жорсткість. Опір теплопередачі $Rq = 0,94 \text{ м}^2 \cdot \text{°K}/\text{Вт}$, показник досягається завдяки двокамерному склопакету (4i-16Ar-4GE-16Ar-4i), що має два енергозберігаючих скла та аргонове наповнення (і-скло та GE). Використовується стандартне флоат-скло завтовшки 4 мм. Індекс звукоізоляції $Rw = 32,0$ дБ (клас шумоізоляції – Д). Вартість – 9700 грн (найнижча вартість серед варіантів *V1*, *V2*, *V3*, *V4*, *V5*). Встановлена стандартна поворотно-відкидна

фурнітура, що забезпечує стандартний функціонал (поворотно-відкидний механізм, мікровентиляція) без специфічних протизламних на що вказує відсутність маркування *RC (Resistant Component)*.

Альтернатива V2. Металопластикова двостулкова віконна конструкція в аналогічній до варіанту *V1* профільній системі (72 мм), але з суттєвим посиленням світлопрозорості та функціональної частин (варіант із триплексом та посиленою фурнітурою RC). Пріоритет у даній альтернативі зміщений у бік захисту та безпеки. Характеристики вікна представлено на рис. 4.2.

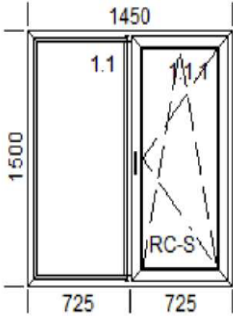
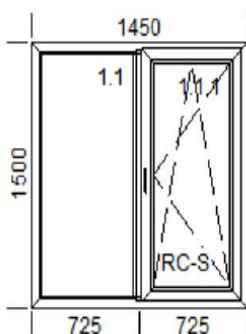
№ поз.: 2	Rw= 40,0	Rq= 1:0.78	шир. x вис., мм: 1450 x 1500	Ціна, грн.: 11937,00
			86,039 кг, кількість: 1 шт.	
				
Тип: LUVIN Grand Pro W5 Колір: Білий (чорний ущ.) Профіль: 72 mm by Veka Фурнітура: activPilot RC-start, зламостійка поворотно-відкидна Колір: Білий WS Ручка з ключем та кнопкою біла Спецпідбір: Мікровентиляція (SBA.K.T) Заповнення: 4i-14Ar-4GE-16Ar-3.1.3 (1.1, 1.1.1)				
Додаткові профілі				ШТ
Підставочний профіль 30/37 мм з джгутом				ММ
				1 1 450

Рисунок 4.2– Загальний вигляд та технічні характеристики базової віконної конструкції (альтернатива *V2*) [84]

Профільна система: 5-камерний профіль завтовшки 72 мм (by Veka). Скління: двокамерний енергоефективний склопакет з аргоновим наповненням та спеціальним напиленням, за показником опору теплопередачі ($Rq = 0,78 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$) нижче ніж варіанту *V1*, але забезпечує достатній рівень енергозбереження при виконанні виконання санітарно-гігієнічних вимог та вимог теплової надійності конструкції зовнішньої стіни.

Альтернатива V3. Преміальна віконна конструкція з підвищеною жорсткістю та безпекою. Двостулкова конструкція (1450 x 1500 мм) на базі профільної системи Veka SL70. Головна особливість – використання технології вклеювання склопакета в стулку, що суттєво підвищує геометричну стабільність та зламостійкість конструкції. Характеристики вікна представлено на рис. 4.3.

№ поз.: 3 $R_w = 38,0$ $R_q = 1:0,74$ шир. x вис., мм: 1450 x 1500 Ціна, грн.: 13096,00
 82,113 кг, кількість: 1 шт.



Тип: LUVIN Comfort V5
 Колір: Білий (чорний ущ.)
 Профіль: Veka SL70
 Фурнітура: *activPilot RC-start*, зламостійка поворотно-відкидна
 Колір: Білий WS
 Ручка з ключем та кнопкою біла
 Спецпідбір: Мікрорентильяція (SBA.K.T)
 Заповнення: 4i-12Ar-4GE-14Ar-3.1.3 (1.1, 1.1.1),
 4i-12Ar-4GE-14Ar-3.1.3 (1.1, 1.1.1), вклеєний в стужку

Додаткові профілі
 Підставочний профіль 30/37 мм з джгутом

шт мм
 1 1450

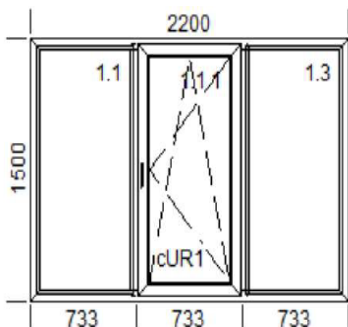
Рисунок 4.3 – Загальний вигляд та технічні характеристики базової віконної конструкції (альтернатива V3) [83]

Показник опору теплопередачі нижчий ніж варіантів V1, V2, але забезпечує допустимий рівень енергозбереження при виконанні виконання санітарно-гігієнічних вимог та вимог теплової надійності конструкції зовнішньої стіни. Зниження опору теплопередачі пояснюється використанням специфічної дистанційної рамки та посиленого заповнення, спрямованого на міцність. Має високий індекс звукоізоляції $R_w = 38$ дБ. Як у варіанті V2 тут використано триплекс (3.1.3), проте в поєднанні з протизламною фурнітурою *activPilot RC-start* та ручкою з ключем. Вклеювання скла робить практично неможливим його видавлювання зі стужки. Вартість варіанту V3 вище ніж варіантів V1, V2.

Альтернатива V4. Тристужкова віконна конструкція, суттєво відрізняється від попередніх альтернатив V1, V2, V3, габаритними розмірами (на 750 мм ширше за попередні варіанти), що робить його особливим об'єктом у вибірці. Має одну активну поворотно-відкидну стужку по центру та дві глухі стужки з боків. Характеристики вікна представлено на рис. 4.4.

Конструкція V4 виконана на базі 5-камерного профілю 72 mm (by Veka). Показник опору теплопередачі становить $R_q = 0,97 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ це найвищий показник теплоізоляції порівняно з альтернативами V1, V2, V3, що досягається завдяки більшій світлопрозорі частини без функцій відкривання, де відсутність додаткових рамок стужки зменшує тепловтрати. Використано двокамерний енергозберігаючий склопакет.

№ поз.: 4 $R_w = 32,0$ $R_q = 1:0,97$ шир. х вис., мм: 2200 х 1500 Ціна, грн.: 14171,00
 116,622 кг, кількість: 1 шт.



Додаткові профілі

Підставочний профіль 30/37 мм з джгутом

шт мм

1 2200

Тип: LUVIN Grand Pro W5
 Колір: Білий (чорний ущ.)
 Профіль: 72 mm by Veka
 Фурнітура: *activPilot*, поворотно-відкидна, 2 протизламні пари
 Колір: Білий WS
 Ручка "Handlich" біла
 Спецпідбір: Мікровентиляція (SBA.K.T)
 Заповнення: 4i-16Ar-4GE-16Ar-4i (1.1, 1.3, 1.1.1)

Рисунок 4.4 – Загальний вигляд та технічні характеристики базової віконної конструкції (альтернатива V4) [84]

У варіанті V4 як і у варіанті V1 відсутній триплекс, що робить скло вразливим до ударних навантажень. Індекс звукоізоляції становить $R_w = 32$ дБ. Фурнітура *activPilot* оснащена двома протизламними парами, що є базовим рівнем захисту для конструкцій такого розміру. Ціна конструкції в абсолютному значенні вища порівняно з варіантами V1, V2, V3, але варто враховувати, що площа цього вікна майже на 50% більша за інші.

Альтернатива V5. Панорамне вікно (великогабаритний фасадний блок) – варіант із максимальною площею засклення. Складна трисекційна конструкція загальними габаритами 2200 х 2400 мм. складається з центральної активної частини (поворотно-відкидна стулка з фрамугою) та двох бокових глухих секцій. Характеристики вікна представлено на рис. 4.5.

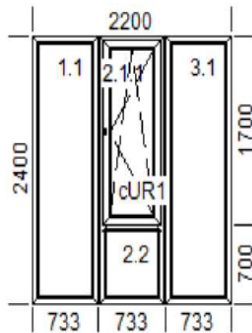
Варіант V5 є більш архітектурно привабливий, ніж альтернативи V1, V2, V3, V4. Віконна конструкція виконана на базі профільної системи Veka SL70, має високі характеристики енергоефективності. Це єдина конструкція серед варіантів, що має диференційовані показники опору теплопередачі для різних зон. Середнє значення становить $R_q = 1,01 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ (для основних зон) та $R_q = 0,88 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ для зони стулки, що демонструє надзвичайно високу енергоефективність для конструкцій такого масштабу. Використано двокамерний енергоефективний склопакет (4i-14Ar-4GE-14Ar-4i), але застосовано стандартне скло 4 мм без триплексу. Звукоізоляція складає $R_w = 31$ дБ.

№ поз.: 5 $R_w = 31,0$

$R_{q1} = 1: 1.01$
 $2: 0.88$
 $3: 1.01$

шир. x вис., мм: 2200 x 2400
204,028 кг, кількість: 1 шт.

Ціна, грн.: 27269,00



Тип: LUVIN Comfort V5
Колір: Білий (чорний ущ.)

Профіль: Veka SL70

Фурнітура: activPilot, поворотно-відкидна, 2 протизламні пари
Колір: Білий WS

H-F SECUST LUXEMBOURG T32-42 WS ручка

Спецпідбір: Мікрровентиляція (SBA.K.T)

Заповнення: 4i-14Ar-4GE-14Ar-4i (1.1, 2.2, 2.1.1, 3.1)

Додаткові профілі

З'єднувач вертикальний Grand W5 (ly-20/42)

116207_ Білий (чорний ущ.)

шт мм

2 2430

Підставочний профіль 30/37 мм з джгутом

1 718

Підставочний профіль 30/37 мм з джгутом

2 726

Рисунок 4.5 – Загальний вигляд та технічні характеристики базової віконної конструкції (альтернатива V5) [84]

Загальна маса конструкції варіанту V5 становить 204 кг, що вимагає використання спеціальних вертикальних з'єднувачів (*Grand W5*), які додають конструкції необхідної жорсткості та вітрової стійкості. Встановлено систему *activPilot* з двома протизламними парами та спеціалізовану ручку *H-F SECUST LUXEMBOURG*, що має захисний механізм від несанкціонованого відкриття ззовні. Вартість є максимальною серед альтернатив, що зумовлено великою площею вікна та використанням підсилюючих профілів.

Вихідні дані. Житлова будівля розташована у I кліматичній зоні. Конструкція зовнішньої стіни включає:

- зовнішню опоряджувальну штукатурку ($\delta = 0,005$ м, $\lambda = 0,7$ Вт/(м·К));
- утеплення мінераловатними плитами ($\delta = 180$ мм, $\lambda = 0,04$ Вт/(м·К));
- кладку з глиняної звичайної цегли ($\delta = 510$ мм, $\lambda = 0,81$ Вт/(м·К));
- внутрішню штукатурку ($\delta = 0,02$ м, $\lambda = 0,93$ Вт/(м·К)).

Мінераловатні плити закріплені до несучої стіни за допомогою клею та пластикових дюбелів з металевим стрижнем (8 шт./м²). Для визначення приведенного опору теплопередачі розглядається фрагмент фасаду розміром 2,7 м × 4,10 м. Опір теплопередачі конструкції стіни визначено в п.п. 2.2. При розташуванні всіх розглянутих альтернатив санітарно-гігієнічні та теплотехнічні вимоги згідно з п. 5.2.1 ДБН [5] дотримано.

4.2 Оцінювання альтернатив за частинними критеріями

Оцінювання характеристик альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ проводиться за формалізованими факторами, що визначені у розділі 2.

1. Критерій $y1$ «Енергоефективність»

Оцінювання критерію $y1$ «Енергоефективність» для кожної альтернативи $V1, V2, V3, V4, V5$ здійснюється за сукупністю формалізованих факторів X_{11}, X_{12} , відповідно до табл. 2.3. Опір теплопередачі вікна приймається відповідно за даними виробника (рис. 4.1 – 4.5). Приведений термічний опір теплопередачі R_{Σ} розраховано за формулою (2.5). Результати оцінювання частинного критерію $y1$ «Енергоефективність» наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Визначення рівня критерію $y1$ «Енергоефективність» альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$

Фактор	Альтернатива				
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
X_{11} Опір теплопередачі вікна, $m^2 \cdot K/Вт$	0,94 (клас В)	0,78 (клас С)	0,74 (клас Д)	0,97 (клас В)	0,97 (клас В)
X_{12} Приведений термічний опір зовнішньої стіни фрагменту, $m^2 K/Вт$	$R_{\Sigma} = 3,7$			$R_{\Sigma} = 3,4$	$R_{\Sigma} = 3,04$
Рівень критерію $y1$	Покращений	Покращений	Нормативний	Покращений	Граничний

Виконується попарне порівняння альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ за критерієм $y1$ «Енергоефективність» із формуванням матриці парних порівнянь.

Альтернативи розглядаються відповідно до порядку рівня їх енергоефективності: $V4, V1, V2, V3, V5$.

- (1) відсутня перевага $V4$ над $V1$;
- (4) майже помірна перевага $V4$ над $V2$;
- (6) майже явна перевага $V4$ над $V3$;
- (7) явна перевага $V4$ над $V5$;
- (4) майже помірна перевага $V1$ над $V2$;

- (6) майже явна перевага $V1$ над $V3$;
- (7) явна перевага $V1$ над $V5$;
- (3) слабка перевага $V2$ над $V3$;
- (5) помірна перевага $V2$ над $V5$;
- (4) майже помірна перевага $V3$ над $V5$.

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця відповідно до формули (3.4):

$$A(Y_1) = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 1 & 7 \\ 1/4 & 1 & 3 & 1/4 & 5 \\ 1/6 & 1/3 & 1 & 1/6 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 1 & 7 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1/7 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.677, 0.246, 0.132, 0.677, 0.064).$$

Розраховане максимальне власне значення матриці парних порівнянь становить $\lambda_{max} = 5.2$. Його близькість до розмірності матриці (кількості альтернатив $m = 5$) свідчить про високий ступінь узгодженості виконаних експертних оцінок. В результаті нормування вектора пріоритетів отримано такі значення критерію Y_1

$$Y_1(V_1) = 3.77;$$

$$Y_1(V_2) = 1.37;$$

$$Y_1(V_3) = 0.73;$$

$$Y_1(V_4) = 3.77;$$

$$Y_1(V_5) = 0.36.$$

2. Критерій у 2 «Архітектурна привабливість та функціональність»

Оцінювання альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ за критерієм у₂ «Архітектурна привабливість та функціональність» здійснюється на основі формалізованих факторів X_{21}, X_{22}, X_{23} , обґрунтованих у підрозділі 2.3 (табл. 2.4, 2.5)

Деталізоване оцінювання факторів X_{21}, X_{22}, X_{23} альтернативи $V1$ наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Деталізована оцінка факторів X_{21} , X_{22} , X_{23} альтернативи $V1$

Фактор	Оцінка	Опис фактору
X_{21} естетика та дизайн	Низький рівень	Форма, розміри та пропорції віконної конструкції є стандартними
X_{22} характеристики профілю, профільної системи та склопакету	Стандартні	Технічні характеристики профільної системи та склопакета відповідають базовим нормативним вимогам. Спеціалізовані комплексні рішення або додаткові функціональні структурні елементи в даній конфігурації не передбачені.
X_{23} додаткові елементи та фурнітура	Наявні	Додаткове оснащення представлено інтегрованими системами вентиляції (привітрювання).

Результати оцінювання альтернатив за критерієм y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність» наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Визначення критерію y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність» альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$

Фактор/ Критерій	Альтернатива				
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
X_{21} естетика та дизайн	Низький рівень	Низький рівень	Низький рівень	Середній рівень	Високий рівень
X_{22} характеристики профілю, профільної системи та склопакету	Стандартні	Стандартні	Високі	Стандартні	Середні
X_{23} додаткові елементи та фурнітура	Мікро вентиляція	Мікро вентиляція	Мікро вентиляція	Мікро вентиляція	Мікро вентиляція . Ручка з механізмом блокування
Критерій y_2	Базовий рівень	Базовий рівень	Середній рівень	Середній рівень	Високий рівень

Виконується попарне порівняння альтернатив V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 за критерієм Y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність» із формуванням матриці парних порівнянь. При формуванні матриць парних порівнянь можуть додатково враховуватись індивідуальні особливості конструкцій навіть у межах одного якісного рівня. Альтернативи розглядаються за рівнем їх архітектурної привабливості V_5, V_4, V_3, V_2, V_1 , маємо відповідні порівнювання:

- (4) *майже помірна* перевага V_5 над V_4 ;
- (6) *майже явна* перевага V_5 над V_3 ;
- (6) *майже явна* перевага V_5 над V_2 ;
- (7) *явна* перевага V_5 над V_1 ;
- (5) *помірна* перевага V_4 над V_3 ;
- (6) *майже явна* перевага V_4 над V_2 ;
- (6) *майже явна* перевага V_4 над V_1 ;
- (2) *ледь слабка* перевага V_3 над V_2 ;
- (2) *ледь слабка* перевага V_3 над V_1 ;
- (2) *ледь слабка* перевага V_2 над V_1 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A(Y_2) = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ \begin{array}{c} \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 2 \\ 6 \\ 7 \end{array} & \begin{array}{c} 1/2 \\ 1 \\ 2 \\ 6 \\ 6 \end{array} & \begin{array}{c} 1/2 \\ 1/2 \\ 1 \\ 5 \\ 6 \end{array} & \begin{array}{c} 1/6 \\ 1/6 \\ 1/5 \\ 1 \\ 4 \end{array} & \begin{array}{c} 1/7 \\ 1/6 \\ 1/6 \\ 1/4 \\ 1 \end{array} \\ & \begin{array}{c} \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \end{array} & \begin{array}{c} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{array} \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.0740 \ 0.1014 \ 0.1362 \ 0.4531 \ 0.8720).$$

Розраховане максимальне власне значення матриці парних порівнянь становить $\lambda_{max} = 5.28$. Його близькість до розмірності матриці (кількості альтернатив $m = 5$) свідчить про високу ступінь узгодженості виконаних експертних оцінок. В результаті нормування вектора пріоритетів отримано наступні значення критерію Y_2 :

- $Y_2(V_1) = 0.45$;
- $Y_2(V_2) = 0.62$;
- $Y_2(V_3) = 0.83$;
- $Y_2(V_4) = 2.77$;
- $Y_2(V_5) = 5.33$.

3. Критерій у3 «Ринкова вартість»

Вартість альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ визначена на основі комерційних пропозицій виробника (рис. 4.1 – 4.5). Процедура оцінювання за критерієм у3 здійснюється відповідно до факторів визначених у п.п. 2.4. Для конструкцій ідентичного типорозміру або таких, що належать до одного цінового сегмента, порівняльний аналіз проводиться на основі прямих вартісних показників. Зведені результати оцінювання альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ за критерієм у3 «Ринкова вартість» представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Визначення критерію у3 «Ринкова вартість» альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$

Фактор / Критерій	Альтернатива				
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
Ціна, грн.	9700	11937	13096	14171	27269
Порівняння ціни	найнижча	середня	середня	найвища	висока
у3 Ринкова вартість	сегмент Оптимальний				сегмент Максимум

Для формування матриці парних порівнянь альтернативи розглядаються у порядку зростання ціни $V1, V2, V3, V4, V5$, отримуються відповідні порівнювання:

- (2) *ледь слабка перевага $V1$ над $V2$;*
- (3) *слабка перевага $V1$ над $V3$;*
- (4) *майже помірна перевага $V1$ над $V4$;*
- (8) *майже абсолютна перевага $V1$ над $V5$;*
- (2) *ледь слабка перевага $V2$ над $V3$;*
- (4) *майже помірна перевага $V2$ над $V4$;*
- (7) *явна перевага $V2$ над $V5$;*
- (2) *ледь слабка перевага $V3$ над $V4$;*
- (6) *майже явна перевага $V3$ над $V5$;*
- (5) *помірна перевага $V4$ над $V5$.*

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A(Y_3) = \begin{matrix} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ \begin{matrix} \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1/2 \\ 1/3 \\ 1/4 \\ 1/8 \end{matrix} & \begin{matrix} 2 \\ 1 \\ 1/2 \\ 1/4 \\ 1/7 \end{matrix} & \begin{matrix} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 1/2 \\ 1/6 \end{matrix} & \begin{matrix} 4 \\ 4 \\ 2 \\ 1 \\ 1/5 \end{matrix} & \begin{matrix} 8 \\ 7 \\ 6 \\ 5 \\ 1 \end{matrix} \\ & \parallel & \parallel & \parallel & \parallel & \parallel \end{matrix} \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{matrix}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.7704, 0.5237, 0.3044, 0.1887, 0.0622)$$

Розраховане максимальне власне значення матриці парних порівнянь становить $\lambda_{max} = 5.17$. Його близькість до розмірності матриці (кількості альтернатив $m = 5$) свідчить про високу ступінь узгодженості виконаних експертних оцінок. В результаті нормування вектора пріоритетів отримано такі значення критерію NY_3 :

$$Y_3(V_1) = 4.16$$

$$Y_3(V_2) = 2.83.$$

$$Y_3(V_3) = 1.65.$$

$$Y_3(V_4) = 1.02.$$

$$Y_3(V_5) = 0.34.$$

4. Критерій у4 «Захист від злому»

Оцінювання альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ за критерієм у4 «Захист від злому» виконуються за двома основними факторами впливу X_{41}, X_{42} , які визначені в табл. 2.7, табл. 2.8.

Результати оцінювання альтернатив за критерієм у4 наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Критерій у4 «Захист від злому» для альтернатив

Фактор/ Критерій	Альтернатива				
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
X_{41} Стійкість основних елементів вікна до злому (профіль, склопакет)	Профіль 72mm by VEKA	Профіль 72mm by VEKA,	Профіль VEKA SL70, склопакет триплекс вклеєний склопакет	Профіль 72mm by VEKA	Профіль VEKA SL70 Вертикальний з'єднувач Grand W5, c
X_{42} Наявність протизламних елементів	Немає,	Activpilot RC-start зламостійка фурнітура RC-start ручка з ключем	Activpilot RC-start зламостійка фурнітура зламостійка фурнітура , ручка з ключем	Activpilot t з 2-ма протизламними парами	Activpilot (фасадна серія) З 2-ма протизламними парами
Критерій у4 захисту від злому	Мінімальний рівень	Середній рівень	Високий рівень	Мінімальний рівень	Середній рівень

Виконується порівняння альтернатив V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 за критерієм Y_4 із формуванням матриці парних порівнянь. Альтернативи розглядаються у порядку їх захищеності від проникнення: V_3, V_2, V_4, V_5, V_1 . Парні порівняння є такими:

- (5) *помірна перевага* V_3 над V_2 ;
- (6) *майже явна перевага* V_3 над V_4 ;
- (6) *майже явна перевага* V_3 над V_5 ;
- (9) *абсолютна перевага* V_3 над V_1 ;
- (3) *слабка перевага* V_2 над V_4 ;
- (3) *слабка перевага* V_2 над V_5 ;
- (6) *майже явна перевага* V_2 над V_1 ;
- (1) *відсутня перевага* V_4 над V_5 ;
- (4) *майже помірна перевага* V_4 над V_1 ;
- (4) *майже помірна перевага* V_5 над V_1 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A(Y_4) = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ \begin{array}{c} \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \\ \parallel \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 6 \\ 9 \\ 4 \\ 4 \end{array} & \begin{array}{c} 1/6 \\ 1 \\ 5 \\ 1/3 \\ 1/3 \end{array} & \begin{array}{c} 1/9 \\ 1/5 \\ 1 \\ 1/6 \\ 1/6 \end{array} & \begin{array}{c} 1/4 \\ 3 \\ 6 \\ 1 \\ 1 \end{array} & \begin{array}{c} 1/4 \\ 3 \\ 6 \\ 1 \\ 1 \end{array} \\ & \begin{array}{c} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{array} \end{array} \end{array}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.056, 0.282, 0.93, 0.164, 0.164).$$

Розраховане максимальне власне значення матриці парних порівнянь становить $\lambda_{max} = 5.2$. Його близькість до розмірності матриці ($m = 5$) свідчить про високу ступінь узгодженості виконаних експертних оцінок. В результаті нормування вектора пріоритетів отримано наступні значення критерію Y_4 :

$$\begin{array}{l} Y_4(V_1) = 0.35; \\ Y_4(V_2) = 2.05; \\ Y_4(V_3) = 5.75; \\ Y_4(V_4) = 0.93; \\ Y_4(V_5) = 0.92. \end{array}$$

5. Критерій у5 «Стійкість до вибухової хвилі»

Оцінювання альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$ за критерієм у5 «Стійкості до дії вибухової хвилі» виконуються за факторами X_{51} , X_{52} , X_{53} формалізованими у табл. 2.13. Зведені результати оцінювання альтернатив за критерієм у5 наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Оцінювання критерію у5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$

Фактор/ Критерій	Альтернативи				
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
X_{51} Сертифікована вибухостійкість вікна	-	-	-	-	-
X_{52} Міцнісні характеристики	Стандартні	Стандартнізлаомост. фурнітура	Підвищені триплекс, вклеєний склопакет злаомост. фурнітура	Стандартніпроти-зламні пари	Стандартніпроти-зламні пари, вертикальний з'єднувач
X_{53} Розмір (площа) скляних ділянок	стандартне вікно	стандартне вікно	стандартне вікно	Велика площа скління	Велика площа скління
Критерій у5 Стійкість до вибухової хвилі	мінімальний рівень (Е)	низький рівень (D)	підвищений рівень (С)	мінімальний рівень (Е)	мінімальний рівень (Е)

Виконується попарне порівняння альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$ за критерієм у5 із формуванням матриці парних порівнянь. Альтернативи розглядається у порядку зниження їх стійкості до вибухової хвилі: $V3$, $V2$, $V1$, $V4$, $V5$. Парні порівняння є такими:

- (5) *помірна перевага* $V3$ над $V2$;
- (6) *майже явна перевага* $V3$ над $V1$;
- (7) *явна перевага* $V3$ над $V4$;
- (8) *майже абсолютна перевага* $V3$ над $V5$;
- (3) *слабка перевага* $V2$ над $V1$;
- (5) *помірна перевага* $V2$ над $V4$;
- (7) *явна перевага* $V2$ над $V5$;
- (3) *слабка перевага* $V1$ над $V4$;
- (5) *помірна перевага* $V1$ над $V5$;
- (3) *слабка перевага* $V4$ над $V5$.

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A(Y_5) = \begin{matrix} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/6 & 3 & 5 \\ 3 & 1 & 1/5 & 5 & 7 \\ 6 & 5 & 1 & 7 & 8 \\ 1/3 & 1/5 & 1/7 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/7 & 1/8 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює:

$$S = (0.1863 \ 0.3598 \ 0.9077 \ 0.0957 \ 0.0530).$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{max} = 5.3$, що є близьким до кількості альтернатив. Це означає, що парні порівняння узгоджені між собою. Після нормування, отримуємо такі значення критерію Y_5 :

$$Y_5(V_1) = 1.16;$$

$$Y_5(V_2) = 2.25;$$

$$Y_5(V_3) = 5.67;$$

$$Y_5(V_4) = 0.60;$$

$$Y_5(V_5) = 0.33.$$

4.3 Порівняльний аналіз альтернатив віконних конструкцій

Для визначення переваг і недоліків кожної альтернативи, а також їх порівняння за ключовими критеріями для обґрунтування найбільш доцільного рішення виконується змістовний аналіз альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$ за критеріями $y1$, $y2$, $y3$, $y4$, $y5$, що наведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Змістовне порівняння альтернатив

Критерій	Лінгвістична оцінка альтернатив				
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
$y1$ Енерго-ефективність	Покращений	Покращений	Нормативний	Покращений	Граничний
$y2$ Архітектурна привабливість та функціональність	Базовий рівень	Базовий рівень	Середній рівень	Середній рівень	Високий рівень

Продовження таблиці 4.7

Критерій	Лінгвістична оцінка альтернатив				
	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
y3 Ринкова ціна	Найнижча сегмент Оптимальний	Середня сегмент Оптимальний	Середня сегмент Максимум	Середня сегмент Оптимальний	Висока сегмент Максимум
y4 Захист від злому	Мінімальний рівень	Середній рівень	Високий рівень	Мінімальний рівень	Середній рівень
y5 Стійкість до вибухової хвилі	Мінімальний рівень (E)	Низький рівень (D)	Підвищений рівень (C)	Мінімальний рівень (E)	Мінімальний рівень (E)

На основі проведеного аналізу технічних характеристик встановлюються специфічні особливості кожної з п'яти альтернатив.

Альтернатива *V1* є базовим рішенням з оптимальним співвідношенням ціни та теплотехнічних показників. Проте цей варіант має найнижчий рівень архітектурної привабливості та функціональності. Конструкція не оснащена протизламними елементами, а склопакет не має зміцнюючих шарів (триплексу), що зумовлює відсутність захисних властивостей у разі дії вибухової хвилі.

Альтернатива *V2* за рівнем енергоефективності дещо поступається варіанту *V1* і має аналогічну (низьку) архітектурну привабливість. Ключовою перевагою є наявність сертифікованої протизламної фурнітури класу *RC-start*, що підвищує загальний рівень безпеки приміщення. Проте стійкість до динамічних (вибухових) навантажень залишається на низькому рівні. Попри належність до одного цінового сегмента з *V1*, цей варіант є дорожчим через складнішу комплектацію фурнітури.

Альтернатива *V3* характеризується помірним рівнем енергоефективності, що нижче за показники *V1* та *V2*. Вартість даної конструкції є вищою за базові моделі, проте нижчою за панорамні рішення (*V4*, *V5*). Ця альтернатива має найкращі показники безпеки серед усіх варіантів завдяки синергії протизламної фурнітури, використання скла-триплексу та інноваційної технології вклеювання склопакета в стулку. Це забезпечує високу стійкість до руйнування та мінімізує утворення небезпечних уламків при дії вибухової хвилі.

Альтернатива *V4* за рахунок збільшених габаритів та площі скління має вищий рівень архітектурної привабливості порівняно зі стандартними вікнами. Конструкція має високу енергоефективність, проте велика площа незахищеного скла робить її критично вразливою

до ударних навантажень. Наявність двох протизламних пар лише частково підвищує захисні властивості, поступаючись спеціалізованій фурнітурі варіантів *V2* та *V3*. У своєму сегменті вікно характеризується високою ціною.

Альтернатива *V5* це панорамна конструкція, що забезпечує максимальний бал за критерієм архітектурної привабливості та естетики. Незважаючи на високий власний опір теплопередачі, велика площа скління призводить до значного зменшення площі капітальних стінових конструкцій, що негативно впливає на приведеній термічний опір огороження приміщення в цілому. Варіант є найдорожчим у вибірці, не має зміцненого склопакета і характеризується низькою стійкістю до дії вибухової хвилі.

Зведені бальні оцінки альтернатив, отримані в результаті попарних порівнянь та розрахунків матриць пріоритетів, наведено в табл. 4.8. Аналіз результатів свідчить про відсутність абсолютно домінуючої альтернативи, яка б переважала інші за всіма критеріями одночасно. За критерієм Y_1 кращою є альтернатива *V4*, за критерієм Y_2 кращою є альтернатива *V5*, за критерієм Y_3 найбільш привабливою є базова альтернатива *V1*, за критеріями Y_4 та Y_5 перевагу має альтернатива *V3*.

Таблиця 4.8 – Критеріальні оцінки альтернатив

Критерій	Бальні оцінки альтернатив				
	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
Y_1	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
Y_2	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
Y_3	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
Y_4	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
Y_5	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33

4.4 Нормування вагових коефіцієнтів критеріїв

Процес визначення вагових коефіцієнтів критеріїв у розробленій моделі реалізовано у два послідовні етапи, що дозволяє адаптувати вибір конструкції до специфічних умов безпеки.

Етап 1. Визначення початкових вагових коефіцієнтів $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ чотирьох традиційних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 залежно від класу комфортності будівлі. Будівля, що розглядається за вихідними даними відповідає житлу «комфорт-класу». Відповідно до табл. 3.1 маємо вагові коефіцієнти традиційних критеріїв:

$$w_1^n = 0.47, w_2^n = 0.28, w_3^n = 0.18, w_4^n = 0.07.$$

Етап 2. Адаптація моделі до факторів безпеки та ризику, що передбачає перерахунок та нормування вагових коефіцієнтів з урахуванням важливості критерію Y_5 «Стійкості до дії вибухової хвилі». Коефіцієнт важливості w_5 критерія Y_5 визначається за формулою 3.6. Вагові коефіцієнти w_{51}, w_{52}, w_{53} для визначення коефіцієнта важливості w_5 залежно від умов розташування об'єкту приймається за табл. 3.2.

З метою оцінки впливу безпекової ситуації на вибір віконної конструкції розглядається чотири варіанти розташування житлового будинку «комфорт-класу», що відрізняються макрорегіональним розташуванням та близькістю до потенційних небезпечних об'єктів ураження:

1. Макрорегіон «Тил» (м. Вінниця) Об'єкт розташований у зоні відносної територіальної віддаленості від лінії фронту. Проте на відстані 300 м від будівлі знаходиться вузловий об'єкт газотранспортної системи (теплоелектроцентральної), що класифікується як об'єкт критичної інфраструктури.
2. Макрорегіон «Опора» (м. Київ). Будівля знаходиться в зоні високої щільності стратегічних об'єктів. На відстані 400 м розташована електрична підстанція магістральних мереж, а на відстані 350 м – підприємство військово-промислового комплексу.
3. Макрорегіон «Фронтир» (м. Чернігів). Місто з особливим статусом через близькість до державного кордону та логістичних шляхів. На відстані 560 м від об'єкта розташована вузлова залізнична станція, яка є елементом транспортної інфраструктури подвійного призначення.
4. Макрорегіон «Рубіж» (м. Харків). Поблизу будівлі (в радіусі 1 км) інфраструктурних чи військових об'єктів немає, але високий рівень загального ризику в регіоні «Рубіж» автоматично підвищує вагомість критерію стійкості до вибухової хвилі через імовірність неселективних обстрілів.

Визначення коефіцієнта важливості w_5 критерія стійкості до дії вибухової хвилі Y_5 детально розглядається для першого варіанту у м. Вінниця. Згідно табл. 3.2 для макрорегіону «Тил» $w_{51}(R_4) = 0.05$. Поблизу будівлі розташований об'єкт критичної інфраструктури (300 м), тому коефіцієнт $w_{52} = 0.1$. Поблизу будівлі є тільки один об'єкт, що відноситься до потенційного об'єкта ураження тому $w_{53} = 0.0$. Відповідно до формули (3.9) маємо :

$$w_5 = w_{51} + w_{52} + w_{53} = 0.05 + 0.1 + 0.0 = 0.15.$$

На основі отриманого значення $w_5 = 0.15$ початкові вагові коефіцієнти $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ підлягають перенормуванню таким чином, щоб сумарне значення всіх п'яти коефіцієнтів відповідало одиниці згідно з базовою умовою (3.3). Після перенормування за формулою (3.8) отримуємо такі значення:

$$w_1 = 0.4, w_2 = 0.24, w_3 = 0.15, w_4 = 0.06, w_5 = 0.15.$$

Результати нормування вагових коефіцієнтів для інших варіантів розташування будівлі наведено у табл. 4.9.

Таблиця 4. 9 – Нормуванням вагових коефіцієнтів

Місто	w_{51}	w_{52}	w_{53}	w_5	$1 - w_5$	До нормування	Після нормування
Вінниця (Тил)	0.05	0.1	0	0.15	0.85	$w_1^n = 0.47$ $w_2^n = 0.28$ $w_3^n = 0.18$ $w_4^n = 0.07$	$w_1 = 0.4$ $w_2 = 0.24$ $w_3 = 0.15$ $w_4 = 0.06$ $w_5 = 0.15$
Київ (Опора)	0.11	0.05	0.05	0.21	0.79		$w_1 = 0.37$ $w_2 = 0.22$ $w_3 = 0.14$ $w_4 = 0.06$ $w_5 = 0.21$
Чернігів (Фронтир)	0.31	0.05	-	0.36	0.64		$w_1 = 0.3$ $w_2 = 0.18$ $w_3 = 0.12$ $w_4 = 0.04$ $w_5 = 0.36$
Харків (Рубіж)	0.4	-	-	0.4	0.6		$w_1 = 0.28$ $w_2 = 0.17$ $w_3 = 0.11$ $w_4 = 0.04$ $w_5 = 0.4$

4.5 Вибір віконних конструкцій з врахуванням безпекового фактору

Прийняття рішення щодо вибору раціональної віконної конструкції базується на використанні багатокритеріальної моделі, що враховує сукупність експлуатаційних та безпекових характеристик. Математичне обґрунтування прийнятого рішення реалізується шляхом визначення максимального значення інтегрального критерію згідно з формулою (3.1).

Відповідно до розробленої методики, інтегральний показник (формула 3.2) розраховується як адитивна зважена сума нормованих частинних критеріїв. Структурно модель адаптована до сучасних умов експлуатації через систему п'яти вагових коефіцієнтів: перші чотири коефіцієнти відображають пріоритетність традиційних параметрів (енергоефективність, вартість, архітектурна привабливість та функціональність, стійкість до злому), п'ятий коефіцієнт є коригуючим і визначає значущість безпекового фактора – стійкості конструкції до дії вибухової хвилі. За результатами моделювання визнається та альтернатива, що відповідає умові максимізації інтегрального критерію Y за формулою (3.1) для заданих умов.

Розрахунки проведено в MS Excel. Результати розрахунку інтегрального критерію альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ у межах визначених варіантах розташування будівлі представлено у табл. 4.10 – 4.13.

Таблиця 4.10 – Визначення інтегрального критерію альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ (розташування будівлі за варіантом 1, м. Вінниця)

Критерії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
$Y1$	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
$Y2$	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
$Y3$	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
$Y4$	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
$Y5$	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
Y	2,435	1,5818	1,9327	2,4716	1,5789

Аналіз результатів табл. 4.10. Максимальне значення інтегрального критерію $Y = 2,47$ з врахуванням безпекового фактору має альтернатива $V4$. Це віконна конструкція (2,20 м x 1,50 м), переважає варіанти

V1, V2, V3, за площею світлопрозорої частини та рівнем енергоефективності. Водночас слід зазначити, що високий підсумковий бал зумовлений передусім теплотехнічними та естетичними показниками, попри відсутність у комплектації спеціалізованої протизламної фурнітури.

Таблиця 4.11 – Визначення інтегрального критерію альтернатив *V1, V2, V3, V4, V5* (розташування будівлі за варіантом 2, м. Київ)

Кри- терії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
<i>Y1</i>	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
<i>Y2</i>	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
<i>Y3</i>	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
<i>Y4</i>	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
<i>Y5</i>	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
<i>Y</i>	2,3409	1,635	2,2173	2,3289	1,4779

Аналіз результатів табл. 4.11. При врахуванні безпекового фактора максимальне значення інтегрального критерію ($Y = 2,34$) має альтернатива *V1*, але альтернатива *V4* є фактично рівнозначною за значенням інтегрального критерію ($Y = 2,33$). Мінімальна розбіжність між результатами (менше 0,5%) свідчить про те, що обидва варіанти є конкурентоспроможними та можуть бути прийнятними для реалізації, залежно від пріоритетності додаткових експлуатаційних вимог.

Таблиця 4.12 – Визначення інтегрального критерію альтернатив *V1, V2, V3, V4, V5* (розташування будівлі за варіантом 3, м. Чернігів)

Кри- терії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
<i>Y1</i>	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
<i>Y2</i>	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
<i>Y3</i>	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
<i>Y4</i>	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
<i>Y5</i>	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
<i>Y</i>	2,1428	1,7542	2,834	2,0052	1,2638

Аналіз результатів табл. 4.12. Максимальне значення інтегрального критерію у межах зазначеного безпекового контексту має альтернатива *V3* ($Y = 2,834$). Висока оцінка обґрунтована комплексною безпекою віконної конструкції, а саме: стандартними геометричними параметрами, зміцненим склопакетом зі склом триплекс та спеціалізованою фурнітурою, що інтегрована у профільну систему з підвищеною жорсткістю стулки.

Таблиця 4.13 – Визначення інтегрального критерію альтернатив м. Харків (регіон Рубіж)

Кри- терії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
<i>Y1</i>	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
<i>Y2</i>	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
<i>Y3</i>	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
<i>Y4</i>	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
<i>Y5</i>	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
<i>Y</i>	2,0677	1,7823	3,021	1,9159	1,2131

Аналіз результатів табл. 4.13. Для даної модельної ситуації характерним є домінування безпекового фактора, зумовлене регіональними ризиками. Максимальне значення інтегрального критерію ($Y = 3,021$) має альтернатива *V3*, яка значно випереджає інші варіанти. Високий пріоритет цієї альтернативи зберігається навіть за умови відсутності в безпосередній близькості об'єктів критичної інфраструктури чи військових цілей. Це пояснюється специфікою розробленої моделі: у регіонах з високим рівнем загальної загрози («Рубіж»), вага критерію стійкості до вибухової хвилі залишається визначальною. Згідно зі змістовним порівнянням характеристик (табл. 4.7), варіант *V3* має найвищий рівень захищеності завдяки комплексному поєднанню триплексу, вклеєного склопакета та посиленої фурнітури. Таким чином, вибір цієї альтернативи є раціональним кроком для мінімізації ризиків неселективних уражень, характерних для даної локації.

Аналіз результатів багатокритеріального оцінювання альтернатив віконних конструкцій *V1*, *V2*, *V3*, *V4*, *V5* для будівлі «комфорт-класу» у чотирьох різних безпекових контекстах (макрорегіонах): «Тил», «Опора», «Фронтір» та «Рубіж» наведено на рис. 4.6.

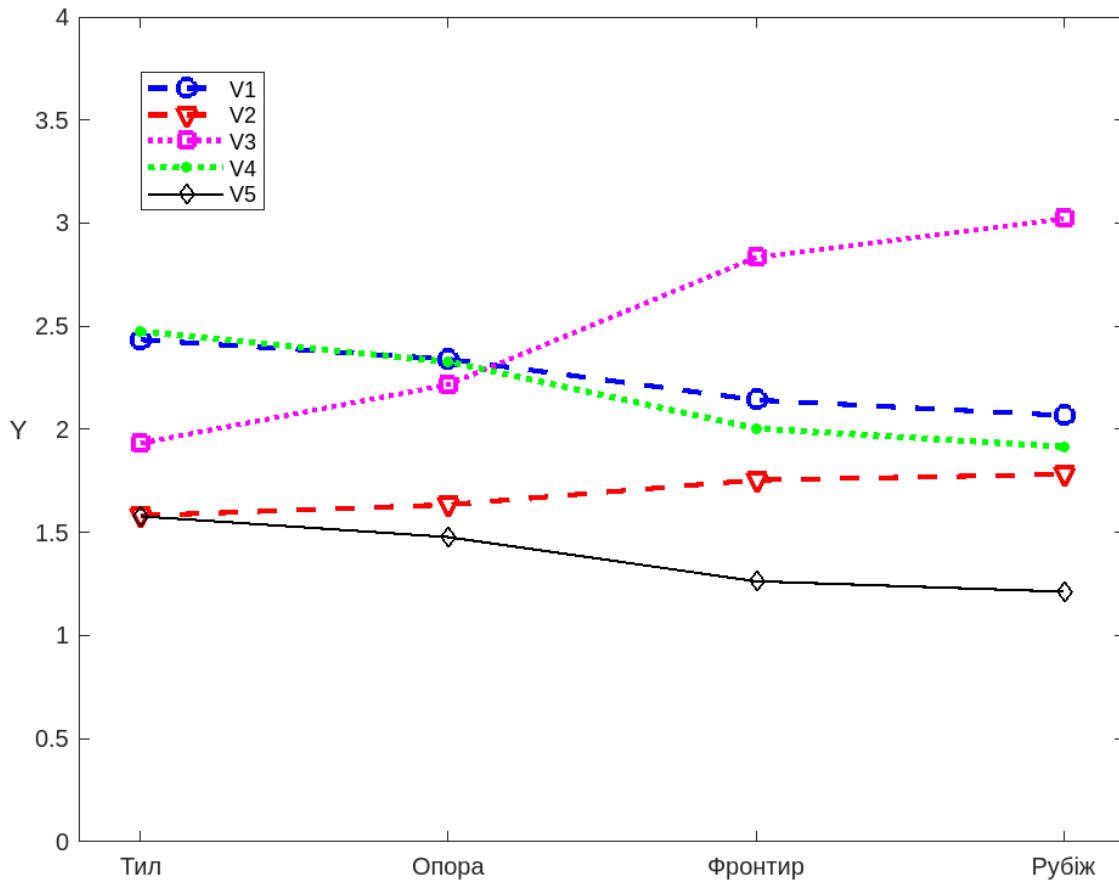


Рисунок 4.6 – Аналіз результатів моделювання щодо вибору віконної конструкції з альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$ [20]

Наведені на рис. 4.6 результати моделювання чітко демонструють, як зміна рівня безпекової загрози кардинально змінює пріоритетність вибору віконної конструкції. Для умовно безпечних територій (макрорегіони «Тил» та «Опора») перевагу мають альтернативи $V4$ (зелена пунктирна лінія) та $V1$ (синя пунктирна лінія). Це пояснюється мінімальною вагою безпекового фактора в цих локаціях, що робить визначальними критерії енергоефективності та економічної доцільності. У зонах підвищеного та високого ризику (макрорегіони «Фронтир» та «Рубіж») пріоритети зміщуються в бік альтернативи $V3$ (рожева пунктирна лінія). Згідно зі змістовним порівнянням (табл. 4.7), саме ця конструкція володіє найвищим рівнем стійкості до дії вибухової хвилі.

Паралельно з цим, для стандартних та енергоефективних рішень ($V4$ та $V1$), що є оптимальними для «Тилу» результати моделювання демонструють зниження інтегрального критерію при переході до зон високого ризику через критично низьку стійкість до динамічних навантажень.

Таким чином, результати моделювання підтверджують нелінійний характер багатокритеріального вибору та необхідність адаптації інженерних рішень до конкретного безпекового контексту.

4.5. Оцінка чутливості інтегрального критерію до зміни соціально-економічного статусу об'єкта

Для визначення чутливості моделі (інтегрального критерію) проаналізовано стабільність прийнятих рішень при зміні соціально-економічного статусу об'єкта («комфорт-класу», «економ-класу», «еліт-класу»).

Розглядається ситуація, коли всі альтернативні варіанти $V1, V2, V3, V4, V5$ розташовані в єдиному регіональному кластері безпеки (м. Вінниця, макрорегіон «Тил») за відсутності поблизу об'єктів критичної інфраструктури та військових об'єктів. Основна відмінність полягає у варіюванні вагових коефіцієнтів для будинків «економ-класу», «комфорт-класу» та «еліт-класу». Такий підхід дозволяє визначити, як зміна вимог до архітектурної привабливості чи енергоефективності впливає на підсумковий рейтинг конструкцій за однакового рівня безпекового ризику.

Вагові коефіцієнти $w_1^n, w_2^n, w_3^n, w_4^n$ прийнято за табл. 3.1. Нормування вагових коефіцієнтів проведено за формулами (3.7), (3.8) та представлено у табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Нормування вагових коефіцієнтів

Об'єкт	w_{51}	w_{52}	w_{53}	w_5	$1 - w_5$	До нормування	Після нормування
Економ класу	0,05	-	-	0,05	0,95	$w_1^n = 0.31;$ $w_2^n = 0.14;$ $w_3^n = 0.5;$ $w_4^n = 0.05.$	$w_1 = 0,29$ $w_2 = 0,13$ $w_3 = 0,48$ $w_4 = 0,05$ $w_5 = 0,05$
Комфорт-класу	0,05	—	-	0,05	0,95	$w_1^n = 0.47;$ $w_2^n = 0.28;$ $w_3^n = 0.18;$ $w_4^n = 0.07.$	$w_1 = 0,46$ $w_2 = 0,27$ $w_3 = 0,17$ $w_4 = 0,05$ $w_5 = 0,05$
Еліт класу	0,05	—	-	0,05	0,95	$w_1^n = 0.16;$ $w_2^n = 0.55;$ $w_3^n = 0.04;$ $w_4^n = 0.25.$	$w_1 = 0,15$ $w_2 = 0,52$ $w_3 = 0,04$ $w_4 = 0,24$ $w_5 = 0,05$

Результати розрахунку багатокритеріальної моделі вибору віконних конструкцій, адаптованої до актуальної безпекової ситуації, для

об'єктів різних категорій («економ», «комфорт» та «еліт») представлено у таблицях 4.15 – 4.17.

Таблиця 4.15 – Результати розрахунку інтегрального критерію альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ для будівлі «економ-класу»

Кри-терії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
$Y1$	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
$Y2$	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
$Y3$	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
$Y4$	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
$Y5$	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
Y	3,2241	2,0513	1,6821	2,0195	1,023

Аналіз результатів табл. 4.15. Найвищий показник інтегрального критерію $Y = 3,22$ має альтернатива $V1$. Дане проєктне рішення передбачає встановлення віконної конструкції стандартних габаритів з енергоефективним склопакетом. Пріоритетність варіанта $V1$ у даному сегменті житла підтверджується його високою економічною привабливістю: дана віконна конструкція є найбільш бюджетною серед досліджуваних варіантів. У межах макрорегіону «Гил» за відсутності локальних безпекових загроз, мінімізація капітальних інвестицій при дотриманні базових норм теплозбереження є ключовим фактором, що забезпечив перевагу цієї альтернативи.

Таблиця 4.16 – Результати розрахунку інтегрального критерію альтернатив для будівлі «комфорт-класу»

Кри-терії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
$Y1$	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
$Y2$	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
$Y3$	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
$Y4$	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
$Y5$	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
Y	2,6384	1,4937	1,4109	2,732	1,725

Аналіз результатів табл. 4.16. За результатами розрахунку найвищий показник інтегрального критерію $Y = 2,73$ має альтернатива $V4$, яке відрізняється збалансованістю за ключовими параметрами. Зі змістовного порівняння (табл. 4.7) вбачається, що варіант $V4$ характеризується оптимальним поєднанням середнього рівня енергоефективності, прийняттого цінового сегмента та належної архітектурної привабливості.

Проте слід зазначити, що показник альтернативи $V1$ ($Y = 2,64$) є дуже близьким до $V4$, що свідчить про високу конкурентоспроможність обох рішень у даному сегменті. Така незначна розбіжність між результатами ($V1$ та $V4$) вказує на те, що остаточне рішення може залежати від суб'єктивних пріоритетів замовника та дозволяє розглядати стратегію їхнього спільного використання в межах одного об'єкта «комфорт-класу». Такий підхід забезпечує максимальну техніко-економічну ефективність за рахунок диференційованого підходу до скління, наприклад, застосування альтернативи $V4$ доцільне для фасадних конструкцій, віталень та зон загального користування, де архітектурна привабливість та середні габарити вікон є пріоритетними для підтримки статусу об'єкта, а застосування альтернативи $V1$ раціональне для допоміжних приміщень, спалень або вікон, що виходять у двір, де на першому місці стоять енергоефективність та мінімізація кошторисної вартості без втрати теплотехнічних характеристик. Отже, впровадження комбінованої схеми « $V1 + V4$ » дозволяє забудовнику оптимізувати загальний бюджет будівництва, зберігаючи при цьому середньозважений показник комфорту та енергоефективності на рівні, передбаченому для будівель «комфорт-класу» в безпечних макрорегіонах.

Таблиця 4.17 – Результати розрахунку інтегрального критерію альтернатив для будівлі «еліт-класу»

Критерії	Вікно 1	Вікно 2	Вікно 3	Вікно 4	Вікно 5
	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
$Y1$	3,77	1,37	0,73	3,77	0,36
$Y2$	0,45	0,62	0,83	2,77	5,33
$Y3$	4,16	2,83	1,65	1,02	0,34
$Y4$	0,35	2,05	5,75	0,93	0,92
$Y5$	1,16	2,25	5,66	0,6	0,33
Y	1,1079	1,2456	2,2701	2,2999	3,0765

Аналіз результатів табл. 4.17. Найвищий показник інтегрального критерію $Y = 3,076$ має альтернатива $V5$. Дана альтернатива представлена панорамною віконною конструкцією, що володіє найвищим рівнем естетичної та архітектурної привабливості. Домінування $V5$ у цьому сегменті пояснюється специфікою вагових коефіцієнтів: для елітного житла пріоритет зміщується від суто економічних показників у бік ексклюзивності, видових характеристик та дизайну. Попри вищу вартість та специфічні теплотехнічні вимоги, панорамне скління забезпечує максимальну ринкову вартість об'єкта та відповідає запитам цільової аудиторії.

Аналіз чутливості рішення до класу об'єкта

Для оцінки стійкості прийнятих рішень та візуалізації зміни пріоритетів проведено аналіз чутливості моделі до соціально-економічного статусу будівлі. Результати порівняння п'яти альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ для різних сегментів ринку нерухомості представлено на рис. 4.7. при виборі віконної конструкції з альтернатив $V1, V2, V3, V4, V5$ представлено на рис. 4.7.

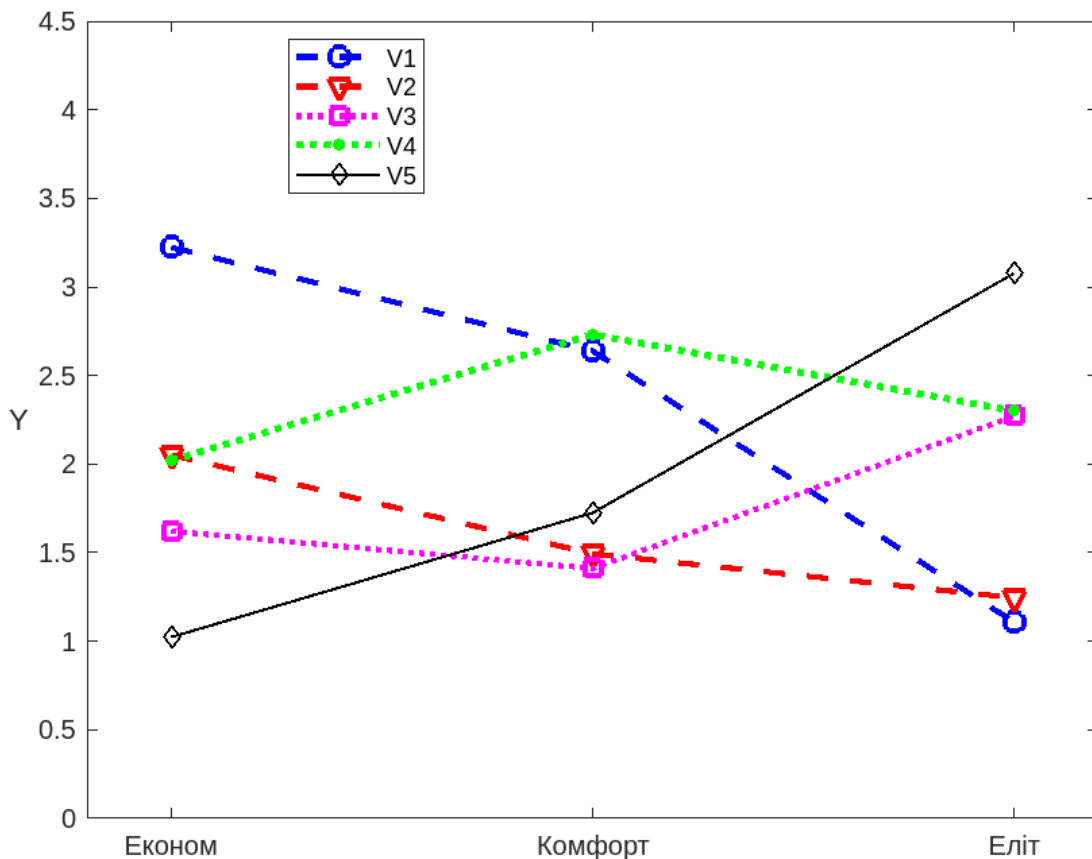


Рисунок 4.7 – Аналіз чутливості рішення до класу об'єкта [20]

Графічна інтерпретація аналізу чутливості наочно демонструє зміну пріоритетності проєктних рішень: від домінування бюджетної енергоефективної системи (*V1*) для економ-класу до виходу на перші позиції архітектурно-виразної панорамної конструкції (*V5*) для об'єктів елітного сегмента. Для будівлі «комфорт-класу» маємо два найкращих варіанти це альтернатива *V4* та *V1* (можливість їх комбінованого застосування). Альтернатива *V3*, яка має найкращий рівень захисту, на найнижчому рівні, що підтверджує, що модель враховує безпекову ситуацію. Аналіз результатів моделювання підтверджує адаптивність розробленої методики до різних стратегій забудови.

Висновки до розділу 4

У результаті практичної апробації розробленої методики багатокритеріального вибору віконних конструкцій підтверджено її ефективність та високу чутливість до зміни зовнішніх чинників. Встановлено, що географічне розташування об'єкта та рівень регіональних загроз є визначальними при ранжуванні альтернатив. При переході від макрорегіону «Тил» до макрорегіону «Рубіж» спостерігається кардинальна зміна пріоритетів: від бюджетних енергоефективних рішень *V1*, *V4* до спеціалізованих захисних систем (*V3*) із вклеєним склопакетом та склом триплекс.

Аналіз чутливості моделі в умовах стабільної безпекової ситуації (м. Вінниця) продемонстрував гнучкість методики щодо запитів цільової аудиторії. Виявлено перерозподіл пріоритетних рішень залежно від сегмента нерухомості: від домінування економічного чинника в «економ-класі» (*V1*) до пріоритету архітектурної виразності та видових характеристик в «еліт-класі» (*V5*).

Доведено, що для об'єктів середнього цінового сегмента найбільш раціональним є вибір альтернативи *V4* або впровадження комбінованої схеми скління (*V1* + *V4*). Це дозволяє досягти оптимального балансу між капітальними інвестиціями, теплотехнічними показниками та естетичними вимогами.

Сформована база ітераційних розрахунків доводить, що інтеграція безпекового фактора в математичну модель дозволяє мінімізувати ризики нераціонального вибору конструкцій, забезпечуючи при цьому нормативні показники енергоефективності та життєвого циклу систем у конкретних експлуатаційних умовах.

5 ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ВІКОННИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

Розроблена у попередніх розділах багатокритеріальна модель дозволяє ранжувати віконні конструкції за технічними та безпековими параметрами. Однак для остаточного ухвалення рішення в інженерній практиці необхідне фінансове підтвердження доцільності інвестицій у більш вартості безпекові системи. З цією метою пропонується модифікація класичної моделі вартості життєвого циклу *LCC* (*LCC – Life Cycle Cost*) шляхом інтеграції до неї фактора ймовірнісних збитків від екстремальних впливів.

5.1 Методологічна основа ризик-орієнтованого до вибору віконних конструкцій

Традиційна парадигма оцінки економічної ефективності огорожувальних конструкцій (*LCC*), регламентована чинними нормами [78, 79] базується на пошуку оптимуму між капітальними витратами та майбутньою економією енергоресурсів. У межах цього підходу вікно розглядається як статичний елемент, головним завданням якого є забезпечення термічного опору при прийнятному терміні окупності інвестицій. Проте досвід експлуатації житлового фонду в умовах повномасштабної збройної агресії виявив критичну вразливість класичної моделі. Ігнорування ризиків екстремальних динамічних навантажень (вибухових хвиль) призводить до вибору дешевшої, але менш стійкої конструкції. У результаті такі конструкції стають джерелом вторинних уражаючих факторів – кинджалоподібних уламків скла, що становлять пряму загрозу життю людей.

Науково-практична суперечність полягає у відсутності економічного інструментарію, який би дозволяв інвестору оцифрувати «вартість збереженого життя» або «ефект відверненого збитку». Для вирішення цієї проблеми пропонується модифікація методу вартості життєвого циклу (*LCC*) шляхом інтеграції до нього фактора безпеки.

Методологічною основою запропонованого підходу є світова парадигма ризик-орієнтованого проектування (*Risk-Informed Design*), викладена у стандарті FEMA 452 [84] та дослідженнях S. Yasseri [71]. Зокрема, у роботі [71] обґрунтовано доцільність імовірнісного аналізу витрат і вигод, де вартість наслідків руйнування охоплює не лише заміну пошкодженої конструкції, а й витрати на лікування травм, втрату функціональності будівлі та супутні майнові збитки. ці концепції підкріплюються положеннями фундаментального довідника «Handbook for

Blast-Resistant Design of Buildings» [86]. В довіднику акцентується, що застосування вибухостійкого скління (зокрема багатошарового ламінованого) та посилених фасадних систем, хоч і підвищує початкові капітальні інвестиції, проте кардинально знижує математичне очікування майбутніх збитків.

Спираючись на ці положення, стає можливою монетизація безпечного фактора. Згідно з базовою концепцією [86], інтегральний ризик (R) визначається як добуток трьох фундаментальних компонентів:

$$R = T \cdot V \cdot C, \quad (5.1)$$

де: T (*Threat*) – загроза (ймовірність та сила впливу);

V (*Vulnerability*) – вразливість системи (конструктивні особливості вікна);

C (*Consequences*) – наслідки (вартісний вираз потенційних втрат).

Інтеграція парадигми ризику (5.1) у модель вартості життєвого циклу (LCC) дозволяє повноцінно монетизувати безпековий фактор. За такого підходу вартість наслідків руйнування охоплює не лише прямі витрати на заміну конструкції, а й медичні видатки на лікування постраждалих та фінансові втрати від тимчасової деградації функціональності будівлі.

На основі аналізу механіки руйнування віконних систем під дією вибуху (розділ 2.5) та систематизації результатів фундаментальних досліджень [48, 49, 54, 86], виокремлено чотири ключові чинники вразливості. Кожен із них має специфічну механіку відмови та безпосередньо детермінує ймовірність утворення небезпечних уражаючих елементів (вторинних уламків або масивних об'єктів), що визначає підсумковий рівень ризику для людей і майна:

1. **Тип скління** (здатність утримувати уламки після руйнування) – це найбільш критичний фактор, оскільки саме світлопрозоре заповнення є первинним фізичним бар'єром. Звичайне (відпалене або незагартоване) скло під дією надлишкового тиску руйнується на великі гострі фрагменти з високою кінетичною енергією, що становить головну загрозу отримання летальних або тяжких травм. Натомість безпечне скління (багатошарове ламіноване з PVB- або SGP-плівкою) не запобігає розтріскуванню, проте завдяки високій адгезії та пластичній деформації полімерного прошарку надійно утримує осколки в площині рами або суттєво гасить швидкість їхнього вильоту, мінімізуючи небезпеку вторинних уражень.
2. **Надійність запірної фурнітури та петельної групи** (ризик виривання або зриву стулки) – вибухова хвиля характеризується

послідовною дією двох фаз (рис. 2.8): стиснення (позитивний тиск) та розрідження (негативний тиск), причому остання триває довше і діє на вже деформовану систему. Якщо запірні елементи (цапфи, петлі, замки) не розраховані на екстремальні динамічні імпульси, відбувається повний зрив стулки з рами. У такому сценарії вся конструкція перетворюється на масивний снаряд, що генерує значно більшу загрозу для життя, ніж окремі фрагменти скла, через значну масу та непередбачувану траєкторію руху.

3. **Жорсткість профільної системи (опір прогину та локальним деформаціям)** – віконний профіль (ПВХ, алюміній або композит) повинен мати достатній момент інерції армування для сприйняття розподіленого імпульсу вибуху без настання критичних деформацій або локального руйнування. При надмірному прогині рами виникає ризик повного випадіння склопакета з паза (*pull-out/ejection*), навіть якщо скло залишилося цілим. Це призводить до миттєвої втрати бар'єрної функції, раптової розгерметизації приміщення та виникнення додаткових зон ураження.
4. **Міцність монтажного вузла та анкерування** (ризик деструкції кріплення) – даний чинник визначає ефективність передачі динамічного зусилля від рами на несучі конструкції будівлі. Недостатня кількість точок фіксації, низька якість анкерів або ігнорування специфіки монтажного шва в умовах негативної фази вибуху призводять до виривання всього віконного блоку назовні або його вдавнення всередину приміщення. Це робить будь-який інший захист неефективним і може спричинити ланцюгові руйнування елементів фасаду.

Зазначені чотири фактори покладено в основу розробки методики кількісної оцінки коефіцієнта конструктивної вразливості.

5.2 Модифікація методу вартості життєвого циклу з інтеграції безпекових ризиків

Класичний підхід до оцінки економічної ефективності, регламентований міжнародними та національними стандартами [78,79] базується на визначенні мінімуму сумарних дисконтованих витрат об'єкту за життєвий цикл (*LCC – Life Cycle Cost*). Традиційна модель життєвого циклу *LCC* фокусується на капітальних інвестиціях (початкові витрати на придбання та монтаж конструкції) та експлуатаційних витратах, пов'язаних із енергоспоживанням (з компенсацією теплових втрат через вікно протягом розрахункового періоду):

$$LCC = K + \sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+d)^t} \rightarrow \min, \quad (5.2)$$

де K – капітальні витрати на придбання та монтаж конструкції;
 E_t – експлуатаційні витрати (вартість теплової енергії) у році t , розраховані протягом опалювального періоду, відповідно до ДБН [14];
 d – ставка дисконтування;
 T – тривалість життєвого циклу (зазвичай 20–30 років).

В умовах підвищених воєнних та техногенних загроз класична модель виявляє критичний недолік – вона повністю ігнорує ймовірність передчасного руйнування конструкції. Це робить очікуваний термін експлуатації T непередбачуваним параметром, а майбутні експлуатаційні витрати E_t втрачають свою релевантність у разі фізичного пошкодження або повного знищення вікна. Крім того, традиційна модель не враховує ризик завдання шкоди життю та здоров'ю людей, що робить такий підхід недостатнім для комплексного обґрунтування вибору віконних систем у сучасних умовах.

Для забезпечення балансу між економічною ефективністю та вимогами безпеки пропонується застосовувати ризик-орієнтований підхід. Математично це реалізується через модифіковану цільову функцію LCC_{mod} , яка інтегрує ймовірнісну оцінку збитків у загальну вартість життєвого циклу шляхом введення вартості ризику :

$$LCC_{mod} = K + \sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+d)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{R_t}{(1+d)^t} \rightarrow \min, \quad (5.3)$$

де $\sum_{t=1}^T R_t$ – вартість ймовірнісних ризиків у році t , що є монетизованим виразом безпекового фактора.

Застосування коефіцієнта дисконтування $\frac{1}{(1+d)^t}$ дозволяє математично привести майбутні очікувані витрати від руйнувань (які можуть виникнути на будь-якому етапі експлуатації) до поточної вартості.

Отже, інтегральний показник LCC_{mod} охоплює три фундаментальні складові:

- Інвестиційну – капітальні витрати на закупівлю та монтаж (K);
- Експлуатаційну – дисконтовані витрати на енергоспоживання (E_t);
- безпекову – вартість імовірнісних збитків від дії вибухових навантажень (R_t).

Згідно з парадигмою ризик-аналізу визначену за формулою (5.1), математичне очікування збитку у контексті задачі врахування безпечного фактора при виборі віконних конструкцій виражається формулою:

$$R_t = P_t \cdot Z \cdot V_s, \quad (5.4)$$

де P_t (*Probability of threat in year t*) – ймовірність впливу вибухової хвилі на об'єкт у році t (визначається на основі статистичних даних для конкретного регіону та зони забудови, ймовірнісних моделей загроз або сценарного аналізу).

Z (*Zone of damage*) – сумарний потенційний максимальний збиток у разі руйнування вікна, що включає:

- Z_{med} – медичні витрати на лікування постраждалих;
- Z_{rep} – витрати на заміну зруйнованої віконної конструкції;
- Z_{prop} – втрати від пошкодження внутрішнього майна в приміщенні від дії вибухової хвилі.

V_s – коефіцієнт конструктивної вразливості вікна

Ключова роль множника V_s у моделі (формула 5.4) полягає у можливості кількісно оцінити економічну ефективність захисних рішень: зниження рівня вразливості конструкції безпосередньо зменшує математичне очікування вартості ризику. Це дозволяє розцінювати вищі початкові витрати (K) на безпекові системи як обґрунтовану інвестицію, що компенсується суттєвим зменшенням третього доданку цільової функції протягом усього життєвого циклу будівлі.

З урахуванням формули (5.4) підсумковий вигляд запропонованої модифікованої моделі вартості життєвого циклу (LCC_{mod}) для віконних систем є таким:

$$LCC_{mod} = K + \sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+d)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{P_t \cdot Z \cdot V_s}{(1+d)^t} \rightarrow \min, \quad (5.5)$$

Третій доданок формули (5.5) відображає приведену до поточної вартості суму очікуваних збитків від потенційних вибухових впливів протягом усього розрахункового періоду експлуатації. Така математична формалізація дозволяє змінити підхід до вибору віконних конструкцій.

- Вона демонструє пряму залежність між інженерними характеристиками (V_s) та фінансовими ризиками.
- Дозволяє об'єктивно порівнювати варіанти з різною капітальною вартістю – якщо дешевше вікно має високий показник вразливості, сумарне значення LCC_{mod} зросте за рахунок ризикової складової, роблячи таке рішення економічно недоцільним у довгостроковій перспективі.

- Створює підґрунтя для прийняття рішень інвесторами та забудовниками, оскільки переводить абстрактне поняття «безпека» у конкретну категорію «відвернуті збитки».

Таким чином, інтеграція безпекового вектора у модель вартості життєвого циклу стає головним фінансовим аргументом на користь застосування посилених та вибухостійких світлопрозорих систем у зонах підвищеного ризику.

5.3 Математична модель коефіцієнта конструктивної вразливості

Коефіцієнт конструктивної вразливості (V_s) є ключовим інженерним параметром, який відображає здатність конкретного технічного рішення нівелювати наслідки вибуху. Для визначення інтегрального значення (V_s) пропонується застосовувати багатокритеріальну адитивну зважену модель ($0 \leq V_s \leq 1$), яка базується на оцінці критичних факторів вразливості віконної конструкції до дії вибухового навантаження:

$$V_s = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot C_i) = k_1 \cdot C_1 + k_2 C_2 + k_3 C_3 + k_4 C_4, \quad (5.6)$$

де: k_i – ваговий коефіцієнт i -го показника вразливості, що відображає його відносний внесок у загальну стійкість системи ;

C_i – оцінка компонента вразливості (показник вразливості компонента конструкції вікна) за чинникам, що визначені розділі 5.1:

C_1 – тип скління ;

C_2 –надійність запірної фурнітури;

C_3 –жорсткість профільної системи;

C_4 – міцність та анкерування монтажного вузла.

Оцінка компонент вразливості (C_i) – безрозмірний показник, визначає вразливість захисних властивостей не всього вікна загалом, а лише окремої її підсистеми (компонента). Такий підхід дозволяє деталізувати загальну вразливість системи через оцінку її окремих компонентів, виявляти критичні вузли конструкції та обґрунтовувати пріоритетні інвестиції в їх посилення.

Значення C_i є нормалізованим у діапазоні $[0; 1]$, де:

– значення, близькі до одиниці ($C_i \rightarrow 1$) – відповідає максимальній критичній вразливості підсистеми (повне руйнування з утворенням вторинних уражаючих факторів);

– значення, близькі до нуля ($C_i \rightarrow 0$) – свідчить про високу здатність компонента поглинати енергію вибуху без втрати цілісності та безпеки для оточуючих.

Методологія визначення компонентів вразливості (C_i).
 Для об'єктивізації значень C_i рекомендується використовувати один з трьох підходів або їх комбінацію.

1. Нормативно – експериментальний: базується на результатах сертифікаційних випробувань (зокрема, за класами вибухостійкості ER1 – ER4 згідно з ДСТУ EN 13541 [11]), та є пріоритетним методом для сертифікованих конструкцій.
2. Розрахунково – аналітичний, що включає чисельне моделювання динамічних навантажень методом скінченних елементів з урахуванням нелінійної поведінки матеріалів, граничних умов, імпульсного характеру навантаження та реальних геометричних параметрів.
3. Експертно – аналітичний з елементами багатокритеріальної оцінки, який поєднує статистичний аналіз та результати натурних обстежень конструкцій, що зазнали вибухових пошкоджень. Для обробки даних та вибору оптимальних рішень застосовується багатокритеріальний підхід, зокрема метод аналітичної ієрархії Сааті (АНР)

Наведені нижче орієнтовні значення оцінки компонентів вразливості (C_i) для типових класів конструкцій визначені на основі аналізу джерел [7, 10, 11, 20, 25, 27, 32 - 36, 37, 39, 48, 85]. Ці показники (табл. 5.1) відображають ступінь втрати захисної функції конкретного вузла під дією динамічного навантаження.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики та оцінка компонентів вразливості (C_i)

Чинник вразливості	Технічне рішення	Оцінка C_i	Опис механіки відмови та наслідків
1. Тип скління	Звичайне флоат-скло	0,9-1,0	Максимальна вразливість; повне руйнування з утворенням гострих уламків, що мають високу кінетичну енергію.
	Загартоване скло	0,5-0,7	Зниження ризику тяжких порізів, проте миттєва розгерметизація приміщення та втрата бар'єра.
	Триплекс (P2A-P5A / ER1-ER4)	0,1-0,2	Мінімальна вразливість; утримання осколків плівкою та поглинання енергії удару.

Продовження таблиці 5.1

Чинник вразливості	Технічне рішення	Оцінка C_i	Опис механіки відмови та наслідків
2. Надійність запірної фурнітури	Стандартна фурнітура - базові роликові цапфи	0,8-1,0	Висока вразливість до виривання стулки всередину приміщення під дією пікового тиску.
	Протизламна (RC2/RC3)	0,2	Підвищена стійкість завдяки грибоподібним цапфам та рівномірному розподілу навантаження.
3. Жорсткість профільної системи	Стандартний ПВХ(армування < 1,5 мм)	0,8-0,9	Значний деформаційний прогин рами, що призводить до випадіння всього склопакета.
	Посилений профіль (армування \geq 2 мм)	0,2-0,4	Опір деформаціям, що забезпечує цілісність контуру заповнення отвору.
4. Міцність монтажного вузла та анкерування	Стандартний (піна + пластини)	0,8-1,0	Низька тримальна здатність монтажного шва, ризик виривання блоку під час фази розрідження - монтаж виключно на монтажну піну та тонкі анкерні пластини зі збільшеним кроком кріплення.
	Посилений монтаж	0,1	Жорстка анкерна фіксація, що гарантує передачу імпульсу на несучі конструкції стін: крок кріплення \leq 300–400 мм, анкерні пластини товщиною \geq 1.5–2.0 мм, дюбелі/хімічні анкери та спеціальні амортизуючі герметики

Показники табл. 5.1 слугують інструментарієм для параметризації вразливості об'єкта, дозволяючи перейти від якісного опису пошкоджень до кількісної оцінки очікуваних ризиків за кожним конструктивним чинником

Розподіл вагових коефіцієнтів k_i .

Фундаментальною вимогою моделі є умова нормування, яка гарантує математичну коректність розрахунку інтегрального показника:

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1,0 \quad (5.7)$$

Таке нормування гарантує, що при будь-яких значеннях C_i , загальний інтегральний коефіцієнт вразливості конструкції V_s математично не перевищує межі діапазону $[0; 1]$.

Для класу типових житлових віконних конструкцій (ПВХ/алюмінієві системи з ламінованим склінням, застосовуваних у цивільній забудові в умовах підвищених ризиків) на основі сучасних досліджень у галузі безпеки й енергоефективності [7, 10, 25, 27, 47-49, 52-56, 66, 77] визначено фіксовані значення вагових коефіцієнтів k_i

$k_1 = 0.45$ (Тип скління) – найвагомійший компонент, оскільки склопакет є первинним бар'єром та займає до 80 % площі вікна;

$k_2 = 0.25$ (Надійність запірної фурнітури) – критичний чинник утримання рухомих частин у рамі, ;

$k_3 = 0.15$ (Жорсткість профільної системи) – визначає опір деформаціям та цілісність контуру;

$k_4 = 0.15$ (Міцність монтажного вузла та анкерування) – забезпечує передачу навантаження на несучі стіни.

Ці значення вагових коефіцієнтів (фіксовані) є стабільними для даного класу конструкцій і можуть використовуватися як постійні параметри моделі. Проте за потреби вони можуть бути уточнені шляхом експертного опитування (наприклад, методом АНР) або калібрування за результатами натурних випробувань для інших типів будівель.

Приклад розрахунку інтегрального коефіцієнта вразливості V_s .

Для ілюстрації роботи моделі (формула 5.6) розглядається варіант віконної конструкції, де використано:

- високоякісне захисне багатошарове ламіноване скління (триплекс з ПВХ-плівкою, $C_1 = 0.15$);
- дешева стандартна запірні фурнітура ($C_2 = 1.0$);
- профіль середнього рівня жорсткості ($C_3 = 0,9$);
- слабке анкерування на стандартні пластини ($C_4 = 1,0$).

Підставляючи ці значення у формулу (5.6) з визначеними вагами k_i , отримуємо:

$$V_s = (0.45 \times 0.15) + (0.25 \times 1.0) + (0.15 \times 0.9) + (0.15 \times 1.0),$$

$$\bar{V}_s = 0.0675 + 0.25 + 0.135 + 0.15 = 0.6025.$$

Отже, навіть при використанні високоякісного захисного скління, загальна вразливість конструкції становить близько 60 % ($V_s \approx 0.60$) через критичні слабкі ланки в фурнітурі та монтажі. Це ілюструє, що ефективність безпекового рішення визначається не окремим елементом, а комплексною взаємодією всіх підсистем.

Інтеграція коефіцієнта V_s у модель математичного очікування збитків дозволяє кількісно врахувати ефект пом'якшення наслідків вибуху завдяки вибору раціонального інженерного рішення. Математична залежність підкреслює, що чим меншою є вразливість конструкції ($V_s \rightarrow 0$), тим менша частка потенційного збитку Z буде реалізована у грошовому еквіваленті.

5.4. Методика оцінки інвестиційної доцільності безпекових інженерних рішень

Завдяки застосуванню адитивної зваженої моделі (5.6), інженер отримує можливість оцифрувати та порівнювати альтернативні рішення за єдиним інтегральним показником вразливості V_s , виявляти «слабкі ланки» та обґрунтовувати вибір оптимальної конфігурації. Для переходу від фізичних характеристик конструкції до фінансових показників ризику, коефіцієнт V_s , інтегрується в розрахунок щорічного математичного очікування ймовірнісних збитків (R_t).

Підстановка показника вразливості V_s у модифіковану модель вартості життєвого циклу LCC_{mod} дозволяє математично довести, що багатократне зниження ймовірнісних втрат ($Z \cdot V_s$) здатне повністю компенсувати початкове зростання капітальних витрат (K). Це підтверджує економічну доцільність інтеграції фактора безпеки у проектні рішення.

Для переходу від фізичної вразливості конструкції до фінансових показників ризику щорічне математичне очікування збитків ($Z_{prob,t}$) для конкретного інженерного рішення визначається вартістю ризиків (R_t) за формулою

$$Z_{prob,t} = R_t = P_t \cdot Z \cdot V_s \quad . \quad (5.8)$$

Різниця між математичними очікуваннями збитків базового варіанту ($Z_{prob,A}$) та безпечного варіанту конструкцій ($Z_{prob,B}$) формує уникнений збиток ($\Delta Z_{prob,t}$) у році

$$\Delta Z_{prob,t} = \Delta Z_{prob,A} - \Delta Z_{prob,B} \quad , \quad (5.9)$$

де $Z_{prob,A}$ – математичне очікуваннями збитків для базового варіанту віконної конструкції (при високому показнику V_s);

$Z_{prob,B}$ – математичне очікуваннями збитків для варіанту безпечної віконної конструкції (при низькому показнику V_s);

$\Delta Z_{prob,t}$ – математичне очікування уникненого збитку у році t . Саме ця величина виступає ключовим фінансовим драйвером окупності інвестицій у безпекові заходи.

Оцінка ефективності за критерієм чистої приведеної вартості (NPV)

Ухвалення фінального інвестиційного рішення щодо вибору віконної конструкції здійснюється на основі методу чистої приведеної вартості (NPV — *Net Present Value*), що відповідає методології міжнародного стандарту [78,79] щодо оцінки вартості життєвого циклу будівель.

Оскільки інвестиції у підвищену міцність вікна (посилене армування, триплекс, спеціальна фурнітура) потребують додаткових капітальних витрат (ΔK), економічна доцільність такого рішення підтверджується лише за умови, що NPV додаткових інвестицій є більшим за нуль ($NPV > 0$). При цьому в якості позитивних грошових потоків (доходів) виступає математичне очікування уникнених збитків ($\Delta Z_{prob,t}$), що розраховується як різниця між імовірнісними втратами для базового та посиленого варіантів конструкцій. Застосування такого підходу надає інвесторам та девелоперам об'єктивне математичне підтвердження: у зонах із високим ризиком динамічних навантажень додаткові капітальні витрати на безпекові рішення повністю компенсуються за рахунок суттєвої мінімізації майбутніх фінансових ризиків.

Розрахунок чистої приведеної вартості ведеться за маржинальними грошовими потоками за наступною формулою

$$NPV = -\Delta K + \sum_{t=1}^T \frac{\Delta E_t + \Delta Z_{prob,t}}{(1+d)^t} \quad , \quad (5.10)$$

де ΔK – маржинальні капітальні витрати (різниця у вартості безпечної та базової віконної конструкцій – додаткові інвестиції у безпеку);

ΔE_t – щорічна економія на енергоресурсах у році t (опаленні та кондиціонуванні)

На практиці інтеграція безпекових рішень комплексно покращує енергоефективність конструкції, за рахунок:

1. Зниження теплопередачі: застосування посилених профілів (необхідних для утримання важкого триплексу) дозволяє встановлювати ширші енергозберігаючі склопакети.
2. Зменшення інфільтрації: безпекова фурнітура з багатоточковим замиканням забезпечує максимально щільний притиск стулки, усуваючи втрати тепла через протяги.

Відповідно, збережені ресурси конвертуються у фінансовий дохід ΔEt , який додатково прискорює окупність проєкту.

Інтерпретація результатів моделювання чистої приведеної вартості

Отримане значення NPV за формулою (5.10) дозволяє інвестору зробити однозначний висновок:

- $NPV > 0$. Проєкт ухвалюється. Сума уникнутих збитків та зекономленої енергії перевищує переплату за безпеку. Інвестиція генерує додаткову вартість для власника.
- *Якщо* $NPV < 0$. Проєкт відхиляється. Ймовірність вибуху в даному регіоні або зоні настільки мала, що надлишкові витрати на захист не окупуються уникненими ризиками.
- *Якщо* $NPV = 0$ Точка беззбитковості. Фінансовий баланс нейтральний. У такому разі, з огляду на соціальну відповідальність та пріоритет збереження людського життя, рекомендується обирати безпечний варіант.

5.5 Апробація та аналіз інвестиційної привабливості безпекових рішень віконних конструкцій

Валідація та перевірка адекватності розробленої економіко-математичної моделі реалізована шляхом її апробації на прикладі порівняльного аналізу світлопрозорих конструкцій для типової житлової кімнати площею 15 м² (спальні з одним віконом).

Для проведення розрахунків було обрано два принципово різних підходи до комплектації віконної системи. Детальні характеристики віконних конструкцій систем наведено в табл. 5.2.

Варіант А – стандартне (базове) рішення вікна.

Варіант Б – реалізує концепцію «безпечного вікна», адаптованого до умов підвищених динамічних навантажень.

Таблиця 5.2 – Специфікація конструктивних рішень вікон

Технічний вузол	Варіант А (Базовий)	Варіант Б (Безпечний)	Вплив на модель (V_s та K)
Склопакет	Однокамерний з флоат-склом (4-16-4)	Однокамерний із ламінованим склом (4.4.2 LowE - Ar - 4)	Знижує C_1 з 1,0 до 0,15. Збільшує вартість на 40%.
Профільна система	ПВХ 3-камерний, армування 1,2 мм	ПВХ 5-камерний, армування 2,0 мм (замкнений контур)	Знижує C_3 з 0,8 до 0,2. Забезпечує жорсткість для триплексу.
Фурнітура	Стандартна (звичайна планка)	Протизламна класу RC2 (грибоподібні цапфи)	Знижує C_2 з 0,9 до 0,2. Запобігає вириванню стулки.
Монтажний вузол	Монтажна піна + стандартні пластини	Хімічні анкери + посилені кронштейни	Знижує C_4 з 0,8 до 0,15. Передає імпульс на стіну.
Кошторисна вартість	8 000 грн	14 000 грн	Формує $\Delta K = 6 000$ грн.

Порівнюються вікна однакового розміру та приблизно однакової теплотехнічної характеристики.

Вихідні дані та параметри розрахунку інвестиційної привабливості безпечових рішень наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Вихідні дані та параметри розрахунку

Параметр	Позначення	Варіант А (Базове)	Варіант Б (Безпечне)
Фінансово- часові параметри			
Розрахунковий період експлуатації, років	T	15	15
Ставка дисконтування	d	0,1 (10%)	0,1 (10%)
Параметри ризику			
Ймовірність вибуху (на рік)	Pt	0,03 (3%)	0,03 (3%)
Макс. потенційний збиток, грн	Z	150 000	150 000
Вартісні показники			
Капітальні витрати, грн	K	8 000	14 000
Додаткові інвестиції, грн	ΔK	—	6 000
Експлуатаційні витрати, грн/рік	ΔE_t	1 500	1 500

$Pt = 0.03$ (3% на рік) – оцінка для типового житлового будинку в зоні підвищеного ризику.

Максимальний сумарний збиток Z у разі повного руйнування вікна (за умови $V_s = 1.0$) включає: заміну вікна (10 тис.), косметичний ремонт приміщення (50 тис.) та медичні витрати/реабілітацію (90 тис. грн).

Показники конструктивної вразливості (V_s).

Розрахунок (табл. 5.4) виконано за формулою (5.6) з фіксованими вагами ($k_1 = 0,45$; $k_2 = 0,25$; $k_3 = 0,15$; $k_4 = 0,15$).

Таблиця 5.4 – Оцінка компонентів вразливості конструкцій

Компонент (i)	Вага (k_i)	Оцінка C_i , А (Базове)	Оцінка C_i , Б (Безпечне)
1. Тип скління	0,45	1,0 (флоат)	0,15 (триплекс)
2. Фурнітура	0,25	0,9 (стандарт)	0,2 (RC2)
3. Профіль	0,15	0,8 (слабке арм.)	0,2 (посилене)
4. Монтаж	0,15	0,8 (стандарт)	0,15 (надійний)
Коефіцієнт вразливості V_s	1,0	0,92	0,17

Розрахунок економічної ефективності інвестицій

Математичне очікування щорічних збитків (Z_{prob}) розраховується за формулою (5.8).

Варіанта А: $Z_{prob,A} = 0.03 \cdot 150000 \cdot 0.92 = 4140$ грн / рік.

Варіант Б: $Z_{prob,B} = 0.03 \cdot 150000 \cdot 0.17 = 765$ грн / рік.

Щорічний уникнений збиток (дохід від безпеки):

$$\Delta Z_{prob,t} = Z_{prob,A} - Z_{prob,B} = 4140 - 765 = 3375 \text{ грн/рік.}$$

Оскільки теплотехнічні характеристики вікон однакові ($\Delta Et = 0$), то додатковий грошовий потік від безпеки становить саме $\Delta Z_{prob,t}$.

Чиста приведена вартість (NPV) за формулою (5.10):

$$NPV = -6000 + \sum_{t=1}^{15} \frac{3375}{(1+0.10)^t},$$

де $\Delta K = 6\,000$ грн - додаткові капітальні витрати.

Використовуючи коефіцієнт ануїтету для $T = 15$ років та $d = 10\%$ (становить $\frac{1 - (1 + 0.10)^{-15}}{0.10} \approx 7.606$), отримуємо :

$$NPV = -6000 + 3375 \cdot 7.606 = -6000 + 25670 = +19670 \text{ грн.}$$

Отримані результати математично доводять високу економічну доцільність інвестицій у безпечне скління. Чиста приведена вартість проєкту $NPV \approx 19\,670$ грн ($NPV > 0$), що свідчить про його високу рентабельність в умовах воєнних ризиків. Додаткові інвестиції у розмірі 6 000 грн на етапі будівництва багаторазово окупаються за життєвий цикл вікна завдяки радикальному зниженню ймовірнісних фінансових втрат. Щорічний уникнений збиток у 3375 грн формує дисконтований дохід у 25670 грн, що з великим запасом перекриває початкові капітальні витрати.

Висновки до розділу 5

Розроблено комплексну економіко-математичну модель вибору віконних систем на основі вартості життєвого циклу (*LCCmod*), яка, на відміну від існуючих, інтегрує фактор безпеки через оцінку ймовірнісних збитків від динамічних навантажень. Запропоновано метод формалізації конструктивної вразливості (*Vs*) за допомогою адитивної зваженої моделі. Визначено вагові коефіцієнти для ключових компонентів вікна, що дозволяє ідентифікувати «слабкі ланки» та обґрунтувати пріоритетні інвестиції в посилення конструкції.

Доведено синергетичний ефект між безпекою та енергоефективністю: використання посилених профілів та багатошарового застосування для протидії вибуховій хвилі одночасно покращує теплотехнічні характеристики будівлі, створюючи додатковий грошовий потік за рахунок енергозбереження.

Апробація моделі на прикладі типового житлового приміщення продемонструвала високу інвестиційну привабливість безпекових рішень. Попри зростання капітальних витрат на 75% (з 8 до 14 тис. грн), чиста приведена вартість проєкту становить $NPV \approx 19\,670$ тис. грн, що підтверджує повну окупність інвестицій за рахунок мінімізації ризиків для капіталу та життя мешканців.

Встановлено, що ключовим фінансовим драйвером окупності в умовах підвищених ризиків є уникнений збиток, який у наведеному прикладі становить 3 375 грн/рік. Це дозволяє рекомендувати перехід від критерію мінімальної ціни до критерію максимальної чистої вартості при відновленні житлового фонду України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У монографії розглянуто актуальну науково-прикладну задачу з розробки та апробації методики багатокритеріального вибору віконних конструкцій, яка, на відміну від існуючих підходів, інтегрує безпековий фактор як рівноцінну складову техніко-економічної ефективності.

Основні результати та висновки роботи полягають у наступному:

1. **Систематизовано принципи вибору віконних систем в умовах** воєнного стану. Доведено, що традиційний фокус виключно на теплотехнічних характеристиках є недостатнім для забезпечення сталої експлуатації будівель. Обґрунтовано необхідність класифікації територій за рівнем безпекової загрози для диференційованого підходу до вибору віконних конструкцій.

2. **Формалізовано систему критеріїв**, що включає енергоефективність, вартість, архітектурну привабливість та стійкість, захист від злону, стійкість до дії вибухової хвилі. Визначено математичні залежності між технічними параметрами вікна (тип профілю, наявність триплексу, технологія вклеювання склопакета) та їхньою здатністю протистояти динамічним навантаженням.

3. **Розроблено математичну модель та методику багатокритеріального вибору віконних конструкцій**, з врахуванням безпекового фактора, що засновану на визначенні інтегрального критерію. Запропоновано двоетапний підхід до визначення вагових коефіцієнтів моделі прийняття рішення. Це дозволило об'єктивно визначати пріоритетність критеріїв залежно від класу об'єктів нерухомості («економ», «комфорт», «еліт») та специфіки їхнього розташування, забезпечуючи гнучкість моделі при зміні зовнішніх умов, класу будівлі («економ», «комфорт», «еліт») та специфіку розташування будівлі.

4. **Проведено практичну апробацію запропонованого методу**, яка підтвердила гіпотезу про нелінійну зміну пріоритетних інженерних рішень.

5. **Розроблено математичну модель впливу безпекових ризиків на процес вибору віконних систем**. Модифіковано показник вартості життєвого циклу (*LCCmod*), який враховує вартість ймовірнісних фінансових ризиків (*Rt*). Запропоновано адитивну зважену модель для розрахунку інтегрального коефіцієнта вразливості *Vs*, що дозволяє трансформувати інженерні характеристики конструкції у грошовий еквівалент очікуваних збитків.

Обґрунтовано практичну цінність роботи для проєктних та будівельних організацій, що займаються відновленням житлового фонду Ук-

раїни. Запропонована методика дозволяє обґрунтовано вибирати віконні системи, що забезпечують оптимальний баланс між інвестиційними витратами, комфортом та безпекою впродовж усього життєвого циклу будівлі.

Таким чином, за результатами проведеного дослідження вирішено науково-прикладну задачу розробки математичного та інструментального апарату для обґрунтування інвестицій у безпечні світлопрозорі конструкції.

Напрями подальших досліджень вбачаються у розробці автоматизованих систем підтримки прийняття рішень (DSS) на основі BIM-технологій для оперативного коригування параметрів безпеки будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010. Настанова щодо проектування і улаштування вікон та дверей. Київ, 2010. Чинний від 01.07.2011. 106 с.
- [2] ДСТУ EN 14351-1:2020. Вікна та двері. Вимоги. Частина 1. Вікна та зовнішні двері (EN 14351-1:2006 + A2:2016, IDT). Київ, 2020. Чинний від 01.02.2021. 81 с.
- [3] ДСТУ EN 12207:2020. Вікна та двері. Повітропроникність. Класифікація (EN 12207:2016, IDT). Київ, 2020. Чинний від 01.05.2021.
- [4] ДСТУ Б EN 12208:2013. Блоки віконні та дверні. Водонепроникність. Класифікація (EN 12208:1999, IDT). Київ, 2013. Чинний від 01.12.2013.
- [5] ДСТУ EN 14608:2021. Вікна. Визначення стійкості рами (EN 14608:2004, IDT). Київ, 2021. Чинний від 01.01.2022.
- [6] ДСТУ EN 12210:2021 Вікна та двері. Стійкість до вітрового навантаження. Класифікація (EN 12210:2016, IDT). Київ, 2021. Чинний від 01.08.2022.
- [7] ДСТУ Б EN 12400:2013. Блоки віконні та дверні. Механічна міцність. Вимоги і класифікація (EN 12400:2002, IDT). Київ, 2013. Чинний від 01.12.2013.
- [8] ДСТУ EN 13115:2021. Вікна. Класифікація механічних властивостей. Стійкість до навантажень (EN 13115:2020, IDT). Київ, 2021. Чинний від 01.01.2022.
- [9] ДСТУ EN 1627:2014. Вікна, двері та жалюзі. Тривкість щодо зламування. Класифікація та технічні вимоги (EN 1627:2011, IDT). Київ, 2014. Чинний від 01.01.2016. 32 с.
- [10] ДСТУ EN 13123-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація та технічні вимоги Частина 2. Діапазон випробування (EN 13123-2:2004, IDT). Київ, 2006. Чинний від 01.10.2007. 7 с.
- [11] ДСТУ EN 13123-1:2019. Вікна, двері та жалюзі. Тривкість до вибуху. Класифікація та технічні вимоги. Частина 1. Ударна труба (EN 13123-1:2001, IDT). Київ, 2019. Чинний від 01.01.2020.
- [12] ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. Київ, 2021. Чинний від 01.09.2022. 21 с
- [13] ДБН В.2.2-15:2019 Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. Зі Зміною №1 Київ, 2021. Чинний від 01.09.2022. 43 с.

- [14] ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ, 2022. Чинний від 01.09.2022. 27 с.
- [15] ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ, 2019. Чинний від 01.03.2019. 137 с.
- [16] Вікна. Призначення та вплив на них. Вимоги до них // Портал Державних Будівельних Норм України : вебсайт. URI: <https://dbn.co.ua/news/vikna/2012-02-19-139> (дата звернення: 28.03.2026)
- [17] Ратушняк Г. С., Панкевич. О. Д., Панкевич В. В. Оцінювання енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2021. Т. 31, №. 2, С. 81-87.
DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-81-87>
- [18] Види пластикових вікон // Вікна Корса : вебсайт. Дата публікації: 02.04.2023. URI: <https://www.korsa.ua/vydy-plastykovyh-vikon> (дата звернення: 28.03.2026).
- [19] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Оцінювання теплоізоляційних показників огорожувальних конструкцій будівель лінгвістичними змінними. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2021. Т. 29, №. 2, С. 77-86. URI: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/697>.
- [20] Панкевич В. В. Підтримка прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій житлових будівель з врахуванням безпекової ситуації : дис. ... доктора філософії 192. Вінниця, 2024. 180с.
- [21] Дерев'яні або пластикові вікна – які краще вибрати // t1.ua : вебсайт. URI: <https://t1.ua/porady/40521-derevyani-abo-plastykovi-vikna-yaki-krashche-vybraty.html#povitrya> (дата звернення: 28.03.2023).
- [22] ДСТУ EN 12608-1:2021 Непластифіковані полівінілхлоридні (ПВХ-U) профілі для виготовлення вікон та дверей. Класифікація, вимоги та методи випробувань. Частина 1. ПВХ-профілі без покриття зі світлими поверхнями (EN 12608-1:2016 + A1:2020, IDT) Київ, 2021. Чинний від 01.01.2022.
- [23] Класи ПВХ профілів // NIKS-m : вебсайт. Дата оновлення: 31.03.2023. URI: <https://niks-m.com/ua/news/klasi-pvx-profiliv/> (дата звернення: 28.03.2026).
- [24] ДСТУ EN 1279-1:2022 Скло в будівлі. Склопакети. Частина 1. Загальні відомості, опис системи, правила обміну, допуски та візуальна якість (EN 1279-1:2018, IDT) Київ, 2022. Чинний від 15.08.2022

- [25] ДСТУ EN 356:2005. Скло в будівництві. Захисне скління Випробування та класифікація за тривкістю щодо ручного зламування. Київ, 2005. Чинний від 01.10.2006. 17 с.
- [26] Склопакети: детальний огляд та технічні характеристики // Фабрика МІРТ вебсайт. URI: <https://mirt-home.com/mirt-fabryka-blog/sklopakety-detalnyj-oglyad-ta-tehnicni-harakterystyky/> (дата звернення: 28.03.2026).
- [27] Blast protection for windows. UN Department of Safety and Security : PSU Information Bulletin. 2021. URI: https://www.unicef.org/jordan/media/5951/file/LRFP-2021-9166373-Annex_4-Blast_Protection_for_Windows.pdf
- [28] Види скла // Fasadinfo. Дата публікації: 25.05.2006. URI: <https://fasadinfo.ua/articles/glass/240> (дата звернення: 28.02.2026)
- [29] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Енергоефективні конструкції фасадної світлопрозорої теплоізоляції : матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. «Інноваційні технології в будівництві-2022» (Вінниця, 25 листопада 2022 р.) 2022. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16715>
- [30] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Ієрархічна класифікація факторів впливу на підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель// Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Т. 27, № 2. с. 204-209. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-204-209>.
- [31] Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kugel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. Building physics in theory and practice. Scientific Journal. 2016. Vol. VIII. No. 4. P. 5-8. (ISSN 1734-4891)
- [32] ДСТУ EN 13126-8:2022 (EN 13126-8:2017 IDT). Будівельна фурнітура. Обладнання для вікон та балконних дверей. Вимоги та методи випробувань. Київ, 2022. Чинний від 01.08.2022. 17 с.
- [33] Фаренюк Г. Г. Методичні основи нового покоління будівельних норм з енергоефективності будівель / Г. Г. Фаренюк, Є. Г. Фаренюк. Наука та будівництво. 2022. № 3-4. С. 16-25. URI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ntab_2022_3-4_3.
- [34] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Визначальні чинники впливу на безпеку віконних конструкцій : матеріали Міжнародної науково-технічна конференції «Енергоефективність в галузях економіки України-2023» (Вінниця, 21-23 листопада 2023 р.). 2023. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/view/19061>.

- [35] Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року URI: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (дата звернення: 30.03.2026).
- [36] Як знизити небезпеку від вікон через вибухи // OKNA.ua. Дата публікації: 27.04.2022. URI: <https://okna.ua/ua/library/yak-znyzty-nebezpeku-vid-vikon-cherez-1> (дата звернення: 30.03.2026).
- [37] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В., Панкевич О. Д. Фактори впливу на енергоефективність світлопрозорих огорожувальних конструкцій : матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України–2021» (Вінниця, 23-25 листопада 2021р.). 2021. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/view/13935>.
- [38] Аналіз віконного ринку України за 2024 рік Підсумки та перспективи URI: <https://oknakonsult.com/media/fileuploads/2024.pdf> (дата звернення: 30.03.2026).
- [39] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В., Панкевич О. Д. Фактори впливу на оцінку безпекової ситуації при виборі віконних конструкцій. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2024. № 2. С. 87–93.
- [40] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В., Панкевич О. Д. Інтегральний підхід до оцінювання та вибору віконних конструкцій житлових будівель з врахуванням безпекової ситуації // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2025. № 2 (39). С. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-83-91>.
- [41] Бабич Ю. Квартира з панорамними вікнами: чи купуватимуть таке житло після завершення війни // РІЕЛ : вебсайт. Дата публікації: 07.07.2022. URI: https://realestate.24tv.ua/bude-popit-kvartiri-panoramnimi-viknami-pislya-zavershennya-viyuni_n2075055 (дата звернення: 30.03.2026)
- [42] Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Організаційно-технологічні чинники впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2022. Т. 33, № 2. С. 203-210. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-203-210>
- [43] Енергокалькулятор вікон і дверей // OKNA.ua : вебсайт. URI: https://okna.ua/ua/energoeffektivnost_okna (дата звернення: 18.10.2023).

- [44] Chowdhary A. K., Sikdar D. Design of electro-tunable all-weather smart windows. *Solar energy materials and solar cells*. 2021. Vol. 222. P. 110921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110921>.
- [45] Carlos E. Ochoa, Myriam B. C. Aries, Evert J. van Loenen, Jan L. M. Hensen Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied Energy*. 2012. Vol. 95. Pp. 238-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>.
- [46] Бабій І. М., Кучеренко Л. В., Борисов О. О., Олійник Н. В. Вибір організаційно-технологічних рішень улаштування огорожувальних конструкцій офісної будівлі за допомогою багатокритеріального аналізу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т. 33, № 2. С. 119-127. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-119-127>.
- [47] Zhao J., Du Y. H. Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar energy*. 2020. Vol. 206. Pp. 997-1017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.090>.
- [48] Басок Б., Недбайло О., Давиденко Д., Беспала Н. Фізичні чинники впливу вибуху на огорожувальні світлопрозорі конструкції. *Огляд методів тестування // Енергетика: економіка, технології, екологія № 2 (2024)*. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303106>.
- [49] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Ідентифікація факторів, які визначають безпеку вікон при дії вибухової хвилі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т. 35, № 2. С. 42-48. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-42-48>
- [50] He Y. et al. The multi-objective optimization of residential building glass... using genetic algorithms: energy consumption, carbon emissions, and health performance. 2025.
- [51] Yin X. et al. Multi-objective optimization of window configuration and furniture... // *Energy and Buildings*. 2023..
- [52] Ziyuan Li , Yapeng Wang Experiment and Simulation of Critical Parameters for Building Windows under Thermal Explosion. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 26. P. 101014. URI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21001775>.
- [53] Van der Woerd J.D., Wagner M., Pietzsch A. Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review. *Glass Struct Eng*. 2022. Vol. 7. Pp. 693-710. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00213-w>.

- [54] Hirankittiwong P. et al. Intelligent Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making for Energy-Saving Building Designs in Construction // Energies. 2025. Vol. 18, No. 11. 2726.
- [55] GSA-TS01-2003. Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings // Architectural Armour : вебсайт. URI: <https://www.architecturalarmour.com/tech-spec/blast-specification-testing/gsa-ts01-2003> (дата звернення: 30.03.2026).
- [56] ISO 16933:2007 International Organization for Standardization / Glass in Building – Explosionresistant security glazing - Test and classification for arena air-blast loading, 2007. 12 p. URI: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38166/cf595a979f29409c8c36cdc75e7c1d3d/ISO-16933-2007.pdf>
- [57] Xu Jun Experimental investigation on constitutive behavior of PVB under impact loading. International Journal of Impact Engineering. 2011. Vol. 38, iss. 2-3. Pp. 106-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.001>.
- [58] Ataei H., Anderson J. C. Mitigating the injuries from flying glass due to air blast. Forensic Engineering 2012: Gateway to a Safer Tomorrow. 2013. DOI: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784412640.015>.
- [59] Arif R. et al. Multi-objective optimization approaches for enhancing building energy efficiency through material and equipment selection. 2025.
- [60] Xia T. et al. Multi-Objective Optimization of Window Design for Energy and Thermal Comfort in School Buildings: A Sustainable Approach for Hot-Humid Climates // Sustainability. 2025
- [61] Ратушняк Г. С., Панкевич. О. Д., Панкевич В. В. Теплотехнічні особливості світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2021. Т. 30, № 1. С. 148-156. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-1-148-156>
- [62] Explosive Resistance Standards for Polycarbonate Enclosures // totalshield. 2022. URI: <https://totalshield.com/blog/explosive-resistance-standards-for-polycarbonate-enclosures/> (дата звернення: 30.03.2026).
- [63] Meneiliuk A., Kyryliuk S., Cherepashchuk L. Development of cost-effective enclosing structures with high heat transfer resistance 2023: DOI: [10.1051/e3sconf/202125809040](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809040)
- [64] SRF and Cable Catchers : PSU Information Bulletin. 2022. 18 p. URI: <https://www.unhcr.org/ua/wp->

[content/uploads/sites/38/2022/08/Annex-A-2_PSU-Information-Bulletin-11-SRF-and-Cable-Catchers.pdf](https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113213)

- [65] Suwen Chen, Xing Chen, Yujia Lu, Xin Guo, Siyi Yi, Yu Luo Towards blast safety of glass facades: Research advances and prospects, *Thin-Walled Structures*, Volume 212, 2025, 113213, ISSN 0263-8231, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113213>
- [66] Wang, X.; Zhong, B.; Tang, J.; Gao, C.; Li, M. Study on the Influence of Window Glass Size on Blast-Resistant Performance. *Sustainability* 2023, 15, 9325. <https://doi.org/10.3390/su15129325>
- [67] Attia Mohamed, M.A. Hossain Khandaker, et al., Enhancing the performance of anti-blast windows through the use of carbon nanotube reinforced polymer gaskets, // *Journal of Building Engineering*, Volume 78, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107634>
- [68] Р. А. Івченко, А. І. Купін, Дослідження методів багатокритеріальної оптимізації для вибору обладнання або деталей на виробництва// *Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*, Том 32 (71) Ч. 1, № 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-1/11>
- [69] І. С. Романченко, М. М. Потьомкін, О. С. Сирський, Метод трикритеріального евклідового ранжування та його використання для багатокритеріального порівняння альтернатив// *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. № 1(34), с. 59–63. Травень, 2019. <http://dx.doi.org/10.33099/2311-7249/2019-34-1-59-63>
- [70] Stewart, M. G., Netherton, M. D.. Security risks and probabilistic risk assessment of glazing subject to explosive blast loading. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008. Vol. 93, No. 4. P. 627–638. DOI: [10.1016/j.ress.2007.03.007](https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.007)
- [71] Yasseri S. Probabilistic Cost-Benefit Analysis for Blast Resistant Design. *FABIG Newsletter*. 2003. No. 34. P. 9–13.
- [72] Morison, C. The resistance of laminated glass to blast pressure loading and the coefficients for single degree of freedom analysis of laminated glass [PhD thesis, Cranfield University]. Cranfield University CERES (Cranfield Collection of E-Research). Cranfield University, 2007. URL:<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/3006>
- [73] Larcher, M., Solomos, G., Casadei, F., & Gebbeken, N. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2012. Vol. 39, No. 1. P. 42–50.. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2011.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.09.006)

- [74] Figuli, L., Papan, D., Papanova, Z., Bedon, C. Experimental mechanical analysis of traditional in-service glass windows subjected to dynamic tests and hard body impact. *Smart Structures and Systems*,. 2021. Vol. 27, No. 2. P. 365–378. DOI: [10.12989/sss.2021.27.2.365](https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.2.365)
- [75] Статистика шляхів проникнення до квартир та будинків // Лабораторія ОКНА.ua : вебсайт. URI: <https://okna.ua/ua/library/upershe-v-ukrayini-opublikovana>
- [76] Штовба С. Д., Галушак А. В. Ідентифікація багатофакторних залежностей за допомогою баз знань. Лабораторний практикум : електронний навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2015. – 96 с. https://www.researchgate.net/profile/Serhiy-Shtovba/publication/292966334_Identifikacia_bagatofaktornih_zaleznostej_za_dopomogou_baz_znan_Laboratornij_praktikum/links/56b2628a08ae795dd5c7b765/Identifikacia-bagatofaktornih-zaleznostej-za-dopomogou-baz-znan-Laboratornij-praktikum.pdf
- [77] Ратушняк Г. С., Панкевич В. В., Панкевич О. Д., Гуменчук А. Є. Модель вибору віконних конструкцій для проектування будівель з урахуванням безпекової ситуації // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 3. С. 17–25. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-17-25>
- [78] ДСТУ EN 15459-1:2017 Енергоефективність будівель. Процедура економічного оцінювання енергетичних систем будівлі. Частина 1. Процедури розрахунку, Модуль М1-14 (EN 15459-1:2017, IDT)
- [79] ДСТУ ISO 15686-5:2020 Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 5. Оцінювання вартості життєвого циклу (ISO 15686-5:2017, IDT)
- [80] Dzhedzhulla V., Heyets V., Voynarenko M., Yepifanova I. Models and strategies for financing innovative energy saving activities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 628. 012004. DOI: [10.1088/1755-1315/628/1/012004](https://doi.org/10.1088/1755-1315/628/1/012004)
- [81] За якими класами поділяють новобудови // Портал Державних Будівельних Норм України : вебсайт. URI: https://dbn.co.ua/publ/za_jakimi_klasami_podiljajut_novobudovi/2-1-0-1445 (дата звернення: 05.04.2026)
- [82] ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою». Київ, 2016. Чинний від 01.01.2017. 34 с.
- [83] ДБН Б.2.2-12:2019. Планування і забудова територій». Київ, 2019. Чинний від 01.10.2019. 185 с.

- [84] Металопластикові вікна LUVIN. Калькулятор вікон // LUVIN : вебсайт. URI: <https://luvin.ua/uk/kalkulator-tsin>.
- [85] FEMA 452. Risk Assessment: A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings. Washington, DC : Federal Emergency Management Agency, U.S. Department of Homeland Security, 2005. 245 p.
- [86] Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings / ed. by D. O. Dusenberry. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010. 486 p. URL: <https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2022/11/0470170549.pdf>.

Електронне наукове видання

**Георгій Сергійович Ратушняк
Ольга Дмитрівна Панкевич
Володимир Вячеславович Панкевич**

**ВИБІР ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ
ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛІ З ВРАХУВАННЯМ
БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено О.Д. Панкевич

Оригінал-макет виготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до видання 08.06.2026 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам № .P2026-075.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2023 р.