

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 691.32:69.059:519.816:351.78

DOI 10.31649/2311-1429-2025-2-83-91

Г. С. Ратушняк

В. В. Панкевич

О. Д. Панкевич

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИБОРУ ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З ВРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано інтегральний підхід до оцінювання й вибору віконних конструкцій для житлових будівель з урахуванням змінної безпекової ситуації. Розроблена модель поєднує класичні частинні критерії (енергоєфективність, архітектурно-функціональні властивості, ринкова вартість, рівень протизламного захисту) із безпековим критерієм - стійкістю до дії вибухової хвилі. Ваги критеріїв визначаються за допомогою поетапного експертного парного порівняння, причому враховано механізм перенормування при зміні безпекового контексту. Для просторового оцінювання ризиків запропоновано кластеризацію, що враховує зонування територій (Тил / Опора / Фронтир / Рубіж / критична зона) на основі близькості до лінії бойових дій або небезпечних кордонів, наближеності до потенційних цілей ракетно-бомбових атак та щільності таких об'єктів у окрузі. Практична частина демонструє застосування моделі на прикладі п'яти альтернативних конструкцій (V1–V5), показуючи різну придатність варіантів для макрорегіонів із різним рівнем ризику. Метод призначений для підтримки інженерного вибору віконних систем у змінених умовах безпеки. Інтегральний підхід забезпечує прозорість ухвалення рішень, можливість обґрунтування вибору у проектній документації та гнучкість до адаптації під зміну вагових пріоритетів і безпекової ситуації.

Ключові слова: віконна конструкція, житлова будівля, захист, безпека, вибухова хвиля, скло, інтегральний підхід, багатокритеріальний аналіз, модель.

Вступ

У сучасних умовах, коли підвищуються вимоги до енергоєфективності, а також актуалізуються питання безпеки та стійкості будівель до небезпечних впливів, роль інженерно обґрунтованого вибору віконних конструкцій на етапі проектування істотно зростає. Вікна є структурно найменш стійкими елементами фасаду, оскільки саме вони найчастіше зазнають руйнувань під дією ударних навантажень, спроб несанкціонованого проникнення або техногенних і надзвичайних подій.

Обґрунтоване визначення типу віконної конструкції повинно здійснюватися саме на етапі проектування, особливо це актуально в умовах перебування України у воєнному стані [1]. На цьому етапі є можливість комплексно поєднати вимоги енергоєфективності, міцності, довговічності й безпеки, забезпечити відповідність нормативним документам та оптимізувати техніко-економічні рішення. Похибки або спрощені рішення на стадії проектування призводять до підвищених тепловтрат, зниження комфорту, зростання експлуатаційних витрат та потенційної небезпеки для мешканців у разі надзвичайних впливів.

Підходи до вибору вікон, що орієнтувалися головню на тепло- та звукоізоляційні показники є традиційними. Останні роки показали, що оцінка ризиків злому, механічних ушкоджень і навіть вибухового впливу повинна стати частиною проектного рішення для певних категорій об'єктів і територій. Таким чином, обґрунтований підхід до вибору віконних конструкцій із врахуванням безпекової ситуації є актуальною складовою сучасного проектування житлових будівель. Він дозволяє мінімізувати ризики, підвищити стійкість огорожувальної оболонки до діючих загроз і забезпечити відповідність споруди сучасним нормативним та експлуатаційним вимогам.

Метою дослідження є формування інтегрального підходу обґрунтованого та структурованого вибору віконних конструкцій житлових будівель з урахуванням енергоєфективності, експлуатаційних властивостей, економічних чинників та параметрів безпекової ситуації, включаючи стійкість до дії вибухової хвилі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання підвищення стійкості та безпеки огорожувальних конструкцій житлових будівель активно розглядається у сучасних дослідженнях в Україні та закордоном [1 - 8]. Сучасний міжнародний огляд методів проектування фасадів/вікон, стійких до вибухів, що наведений авторами [2] дає змогу врахувати передові практики у проектуванні та показує, що тема стійких вікон і фасадів є актуальною. В роботах [3,4] ідентифіковано фактори, що визначають безпеку вікон за умов вибухової хвилі: тип/структура скла, площа скління, закріплення, розташування будівлі. В роботі [5] наведено аналіз скла й конструкцій скління, реалізація заходів для запобігання розльоту уламків і мінімізації фрагментації — зокрема, застосування ламінованого скла, спеціальних плівок, кріплень та catcher-систем, які утримують скло в рамі після руйнування. У роботі [6] розглянуто основні фізичні параметри вибухової хвилі: тиск, імпульс, розповсюдження фронту хвилі, та їхнього впливу на скло, рами і кріплення а також натурні підходи до дослідження вибухових навантажень та аналіз факторів, що визначають її руйнівний вплив на елементи огорожувальних конструкцій будівель. В роботі [7] представлено огляд новітніх досліджень щодо безпеки скляних фасадів та вікон під впливом вибухового навантаження, проаналізовано нові моделі, матеріали, підходи до проектування. Дослідження впливу розмірів скляних елементів на здатність вікна витримати вибухове навантаження, що є важливим для проектування та вибору вікон з підвищеною безпекою наведено у роботах [8].

Інженерна індустрія реагує на реальні виклики, тому тема вибору конструкцій із урахуванням вибухової безпеки стає не тільки теоретичною, а й практичною. Українські виробники [9] вже почали сертифікацію вікон під клас вибухостійкості, пройшли тести та присвоєння класу EXR2 (NS) відповідно до стандарту.

Аналіз досліджень та публікацій показує що, незважаючи на розвинену нормативно-технічну базу та значну кількість досліджень у сфері теплотехнічних і конструктивних властивостей віконних систем комплексні підходи та методи, що поєднують технічні та безпекові критерії вибору вікон для житлових будівель залишаються недостатньо опрацьованими.

Теоретичні передумови та результати дослідження

Будівельні норми України [10,11] та державні стандарти [12-14] формують комплекс вимог спрямованих на забезпечення безпеки мешканців житлових будівель у надзвичайних ситуаціях. У цих нормативах визначені положення щодо підвищення стійкості й надійності основних огорожувальних конструкцій, зокрема зовнішніх стін і покрівель, регламентовано вимоги до протипожежного захисту, безпечної евакуації, застосування негорючих матеріалів, а також облаштування сховищ та укриттів цивільного захисту. Водночас норми фактично не містять регламентованих вимог або рекомендацій щодо вибору типів віконних систем у житловому будівництві з урахуванням рівня безпекових ризиків, зокрема стійкості до вибухових навантажень, ударно-хвильових впливів чи вторинних факторів ураження. Вибір віконних конструкцій залишається поза системним підходом до безпеки, що суперечить сучасним викликам, пов'язаним із зростанням загроз ракетно-бомбових атак, обстрілів та інших бойових дій на території України. Таким чином, незважаючи на наявність розвиненої нормативної бази у сфері забезпечення загальної конструктивної безпеки, питання оцінювання й вибору віконних конструкцій в умовах динамічної безпекової ситуації практично не врегульоване. Це зумовлює необхідність розроблення методичних підходів, математичних моделей та критеріїв, які дадуть змогу обґрунтовано приймати інженерні рішення на етапі проектування житлових будівель.

Задача вибору віконної конструкції на стадії проектування має багатокритеріальний характер, оскільки передбачає одночасне врахування низки різномірних факторів та потребує визначення оптимального балансу між ними. Багатокритеріальний аналіз дозволяє комплексно оцінити сукупність показників (зокрема енергоефективність, архітектурно-функціональні властивості, вартість, рівень захисту та ін.) і знайти рішення, яке забезпечує узгоджене задоволення кількох критеріїв на прийнятному рівні.

Прийняття рішення при виборі віконних конструкцій житлових будівель розглянемо як пошук найкращого (оптимального) варіанту із можливих наперед заданих варіантів віконних конструкцій: V_1, V_2, \dots, V_m (альтернатив). Альтернативами виступають віконні конструкції, що відрізняються між собою набором технічних параметрів та експлуатаційних характеристик. Кожна альтернатива відповідає усім вимогам проектування віконних конструкцій за будівельними нормами, але жодна

альтернатива не перевищує інші за всіма критеріями одночасно. Якщо б один із варіантів віконної конструкції був очевидно кращим за всіма показниками, використання моделі не було б необхідним, оскільки рішення можна прийняти без додаткового аналізу. Однак у практиці часто зустрічаються випадку, коли різні альтернативи переважають за різними підмножинами частинних критеріїв, тому виникає потреба у розробці моделі що дозволяє визначити компромісне рішення, враховуючи вагомість кожного критерію та значущість переваг. Завдання полягає у виборі такого варіанту віконної конструкції серед доступних, який найбільш збалансовано задовольняє одночасно всі критерії: енергоефективність, архітектурну привабливість та функціональність, вартість, рівень захисту від несанкціонованого доступу та стійкість до дії вибухової хвилі.

При формуванні математичної моделі підтримки прийняття рішень пропонується здійснювати вибір віконної конструкції за такими критеріями:

- y_1 – «Енергоефективність»;
- y_2 – «Архітектурна привабливість і функціональність»;
- y_3 – «Ринкова вартість»;
- y_4 – «Рівень протизламного захисту»;
- y_5 – «Стійкість до дії вибухової хвилі».

Чотири з них є традиційними та відображають основні вимоги до сучасних огорожувальних конструкцій. П'ятим частинним критерієм запропоновано оцінювати стійкість віконної конструкції до впливу вибухової хвилі. Такий підхід дозволяє комплексно враховувати актуальні виклики безпеки, що особливо важливо у сучасних умовах.

Встановлені критерії (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5) визначаються набором факторів, що дозволяють визначити змістовну оцінку кожного критерію. Формалізація факторів та структурно - логічна схема прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій при проектуванні будівель наведена в роботах авторів [1].

Критерій y_1 «Енергоефективність» визначається факторами: X_{11} – опір теплопередачі вікна; X_{12} – приведений термічний опір зовнішньої стіни будівлі (приміщення). Критерій y_1 оцінюється рівнем: граничний, нормативний, покращений, інноваційний.

Критерій y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність» вікна визначено факторами: X_{21} – естетика та дизайн; X_{22} – характеристики профілю, профільної системи та склопакету; X_{23} – додаткові елементи та фурнітура. Критерій y_2 оцінюється рівнем: низький, середній, високий.

Критерій y_3 «Ринкова ціна» формують фактори: X_{31} вартість матеріалів та компонентів вікна; X_{32} – конфігурація та складність конструкції вікна; X_{33} – виробник, бренд, регіональні фактори. Критерій y_3 оцінюється рівнем (за ціновим сегментом): економічний, середньоринковий, високий.

Критерій y_4 «Захист від злому» визначено факторами: X_{41} – стійкість основних елементів до злому (профіль, склопакет); X_{42} – наявність додаткових зламостійких елементів (фурнітури, замки). Критерій y_4 оцінюється рівнем: базовий, підвищений, надійний.

Критерій y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» визначено факторами: X_{51} – вибухостійкість вікна (клас тривкості); X_{52} – міцнісні характеристики; X_{53} – розмір (площа) скляних ділянок. Критерію y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» є новим при прийнятті рішення щодо вибору віконної конструкції. Критерію y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» оцінюється рівнем стійкості: А – спеціалізований, В – високий, С – підвищений; D – низький, Е – мінімальний.

Значення частинних критеріїв, необхідні для прийняття рішень, визначено на основі значення критеріїв y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 з використанням експертного попарного порівняння альтернатив (метод парних порівнянь Сааті). Такий підхід є зручним для експертів і забезпечує вищу адекватність оцінювання, оскільки порівняння “пара-на-пару” сприймається значно легше, ніж встановлення абсолютних числових характеристик. Експерт оцінює наскільки один критерій важливіший за інший за шкалою Сааті (1–9 балів) для кожної альтернативи $y_1(V_1), y_1(V_2), \dots, y_1(V_m)$. Шкала Сааті дозволяє відобразити відносну перевагу однієї альтернативи над іншою: 1 – перевага відсутня; 2 – ледь слабка перевага; 3 – слабка перевага; 4 – майже помірна перевага; 5 – помірна перевага; 6 – майже явна перевага; 7 – явна перевага; 8 – майже абсолютна перевага; 9 – абсолютна перевага. Крім того, попарне порівняння дозволяє враховувати слабкоформалізовану та частково неявну інформацію про властивості альтернатив, що часто неможливо описати у вигляді чітких кількісних параметрів.

Для прийняття рішення відповідність альтернатив кожному із критеріїв пронормовується на єдиний інтервал $[0, 10]$. Пронормовані значення критеріїв позначено:

- Y_1 – рівень енергоефективності;
- Y_2 – рівень архітектурної привабливості;
- Y_3 – ціновий рівень;
- Y_4 – рівень захисту від злому;
- Y_5 – рівень стійкості до вибухової хвилі.

Чим вище значення частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 , тим кращою є альтернатива порівняно з іншими, і тим сильнішою стає її перевага. Оскільки розглядається задача вибору, тобто завдання полягає у визначенні найбільш оптимальної альтернативи, а не в абсолютній оцінці її характеристик, достатньо, щоб нормалізовані критерії відображали відносну перевагу кожної альтернативи порівняно з іншими.

Інтегральна модель оцінювання й вибору віконних конструкцій для житлових будівель побудована у вигляді лінійної згортки зважених частинних критеріїв

$$Y = w_1 Y_1 + w_2 Y_2 + w_3 Y_3 + w_4 Y_4 + w_5 Y_5, \quad (1)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – вагові коефіцієнти (коефіцієнти важливості) частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 відповідно.

Вагові коефіцієнти (важливість критеріїв) визначаються числом із інтервалу $[0, 1]$ і показують вплив кожного частинного критерію на прийняття рішення: чим більше значення, тим важливіший критерій. Для задач вибору віконних конструкцій важливою є регуляризація, яка забезпечує стійкість, узгодженість та здатність моделі до генералізації. Відповідно до правил регуляризації встановлюються такі обмеження:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1. \quad (2)$$

У такому випадку інтегральний критерій набуває значень у тому ж інтервалі, що й частинні критерії, тобто в діапазоні $[0, 10]$. Вибір рішення D здійснюється шляхом обрання альтернативи з максимальним значенням інтегрального критерію Y :

$$D = \arg \max (Y(V_1), Y(V_2) \dots Y(V_m)). \quad (3)$$

Вагові коефіцієнти частинних критеріїв запропоновано визначати у два етапи, що забезпечує гнучкість моделі.

На першому етапі за допомогою методу парних порівнянь Сааті визначається співвідношення важливостей чотирьох традиційних критеріїв для будівель різних класів (економ, комфорт, еліт). На рис. 1 показано порівняння вагових коефіцієнтів w_1, w_2, w_3, w_4 частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 .

На другому етапі окремо визнається важливість п'ятого критерію w_5 - стійкості до впливу вибухової хвилі. Після цього здійснюється перенормування вагових коефіцієнтів традиційних критеріїв з урахуванням безпекового чинника. Такий дворівневий підхід дозволяє легко адаптувати модель до зміни безпекової ситуації, зберігаючи при цьому структурованість та логічність оцінювання.

Оцінювання коефіцієнту w_5 здійснюється на основі просторово-безпекового зонування, що враховує: віддаленість від зони бойових дій; віддаленість від об'єктів можливих ракетно-бомбових атак та кількість таких об'єктів поблизу об'єкта будівництва.

$$w_5 = w_{51} + w_{52} + w_{53} \quad (3)$$

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

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

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

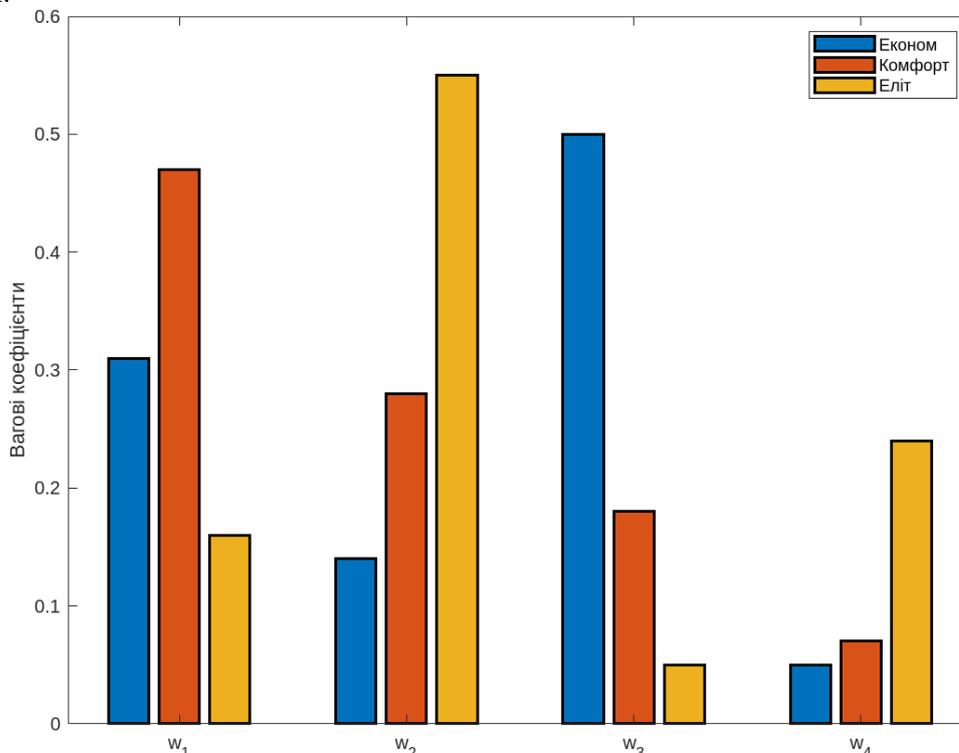


Рисунок 1 – Порівняння пріоритетності (вагових коефіцієнтів) критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 для будівель класів економ, комфорт, еліт на першому етапі моделювання

Територіальна типологізація за рівнем потенційної загрози (зонування за рівнем воєнної небезпеки) наведена на рис. 2.

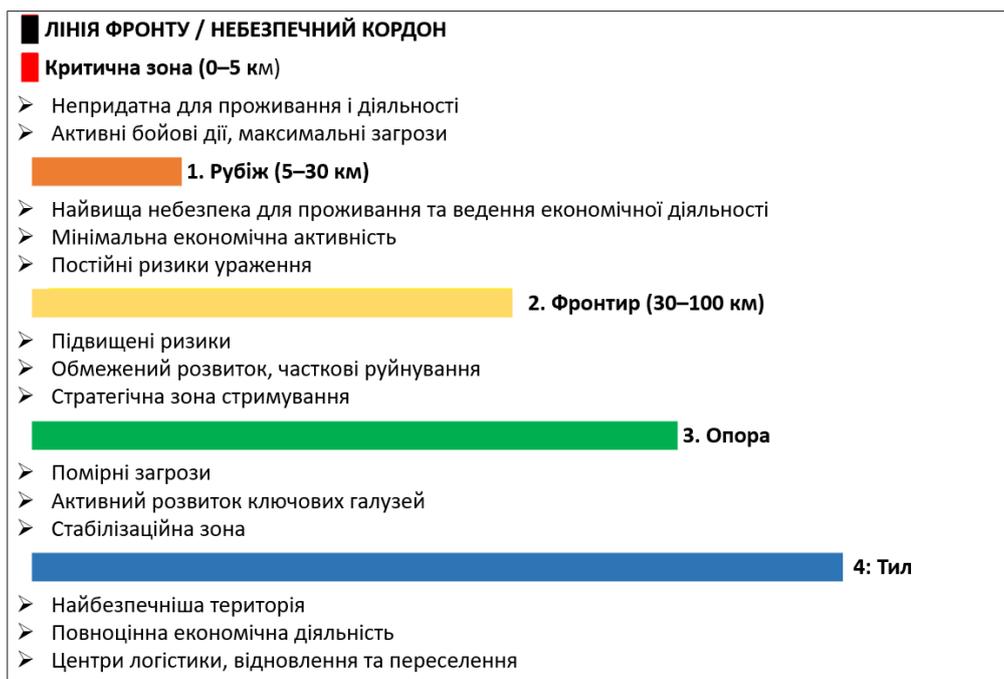


Рисунок 2 – Схема зонування територій за рівнем регіональної безпеки

Визначення значень вагових коефіцієнтів W_{52}, W_{53} наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Вагові коефіцієнти для оцінки важливості критерію Y_5

Коефіцієнт	Умови для визначення коефіцієнту	Значення
W_{52} коефіцієнт, що враховує віддаленість від об'єктів можливих ракетно-бомбових атак	відстань до потенційних цілей від проєктуємої будівлі до 300 м	$w_{52} = 0,1$
	відстань від проєктуємої будівлі до потенційних цілей в межах 300 - 700м	$w_{52} = 0,05$
	відсутні потенційні цілі	$w_{52} = 0$
W_{53} коефіцієнт, що враховує кількість об'єктів можливих ракетно-бомбових атак.	наявні 2 або більше потенційних цілей в радіусі 500 м від проєктуємої будівлі	$w_{53} = 0,05$.
	менше 2 потенційних цілей в радіусі 500 м від проєктуємої будівлі	$w_{53} = 0$

Продемонструємо практичне застосування інтегрального підходу до оцінювання та вибору виконних конструкцій з альтернативних варіантів $V1, V2, V3, V4, V5$ для житлових будівель з врахуванням безпекової ситуації. Усі запропоновані варіанти (рис. 3) відповідають чинним нормам і стандартам, тобто є допустимими. При цьому жодна альтернатива не переважає одразу за всіма критеріями, тому всі вони перебувають у зоні компромісу, і остаточне рішення залежить від інтегральної оцінки важливості критеріїв.

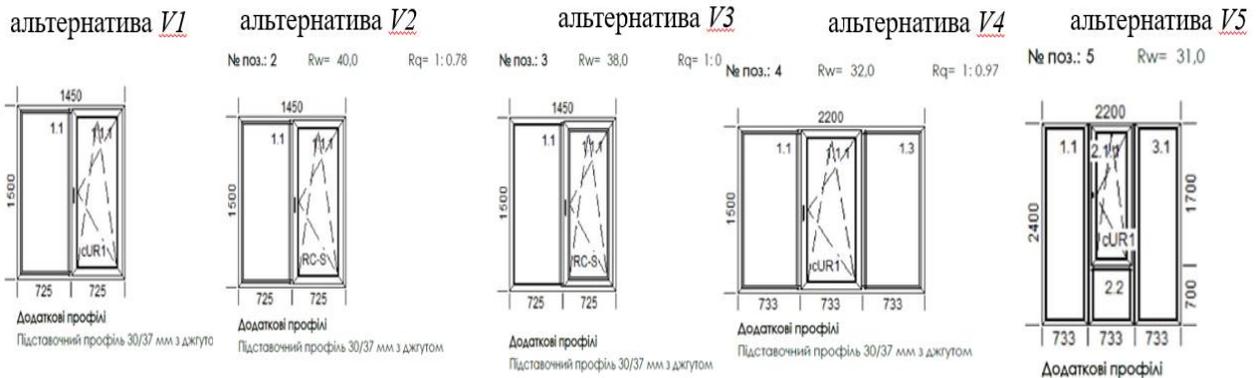


Рисунок 3 – Характеристики вікон (опис альтернатив) $V1, V2, V3, V4, V5$

- $V1$. Стандартне вікно з енергоефективним склопакетом. Опір теплопередачі вікна $0,94 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Клас шумоізоляції Д. Додаткових протизламних характеристик не передбачено.
- $V2$. Стандартне вікно з енергоефективним склопакетом. Опір теплопередачі вікна $0,78 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, має зламостійку фурнітуру.
- $V3$. Вікно протизламне, з профілем SL 70, вклеєним стулку склопакетом. Опір теплопередачі вікна $0,78 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Склопакет зі склом триплекс та протизламною фурнітурою.
- $V4$. Енергоефективне вікно розмір $2200 \times 1500 \text{ мм}$. Опір теплопередачі вікна $0,97 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$., немає протизламної фурнітури,
- $V5$. Панорамне вікно, має високі характеристики енергоефективності - опір теплопередачі склопакетів 1: $1,01 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, 2: $0,88 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; 3: $1,01 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, без додаткових функцій, має дві протизламні пари, профіль SL70.

Будівля, яка прийнята до розгляду розташована у I кліматичній зоні. Конструкція зовнішньої стіни: зовнішня опоряджувальна штукатурка $\delta = 0,005 \text{ м}$; утеплення мінераловатними плитами $\delta = 180 \text{ мм}$; кладка з цегли глиняної звичайної $\delta = 510 \text{ мм}$; внутрішня штукатурка $\delta = 0,02 \text{ м}$. Мінераловатні плити кріпляться до несучої стіни за допомогою клеєного шару та пластикових

дубелів з металевим стрижнем. Фрагмент стіни що розглядається становить 2,7 м x 4,10 м. Санітарно-технічні вимоги та вимоги теплової надійності при представлених альтернативних варіантах вікон згідно ДБН [10] дотриманні.

За результатами моделювання обирається альтернатива з найбільшим значенням інтегрального критерію Y за формулою (3). Інтегральний критерій визначається за формулою (1), як зважена сума пронормованих частинних критеріїв. Оцінка важливості врахування безпекової ситуації прорахована за моделлю за формулою (3). Розрахунок проведено для 4 варіантів розташування будівель комфорт-класу з різними регіональними кластерами безпеки. Умови розташування будівель:

- макрорегіон Тил - поблизу розташована телевежа 300 м (об'єкт критичної інфраструктури);
- макрорегіон Опора - на відстані у 400 метрів від будівлі знаходиться електрична підстанція, а на відстані 350 м – завод військово-промислового комплексу.
- макрорегіон Фронтір - залізнична станція розташована відстань 560 м.
- регіон Рубіж - інфраструктурних та військових об'єктів поблизу немає.

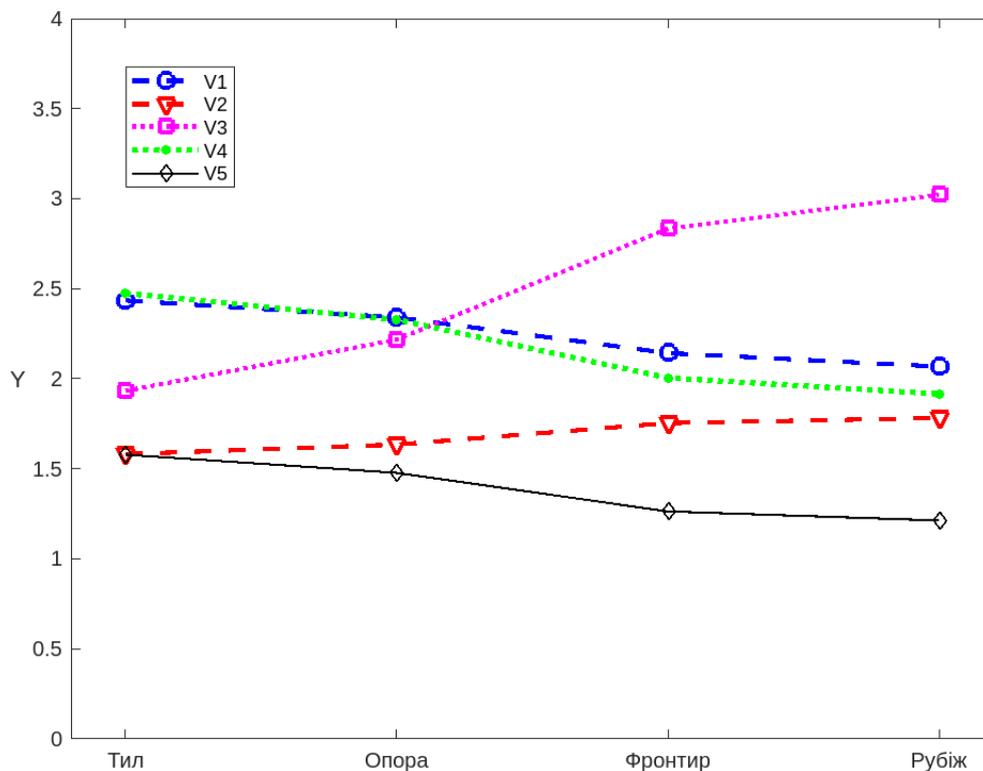


Рисунок 4 – Оцінка та порівняння альтернатив віконних конструкцій на основі результатів моделювання

Аналіз отриманих даних моделі щодо вибору найбільш прийнятної віконної конструкції з альтернатив $V1$, $V2$, $V3$, $V4$, $V5$ з врахуванням безпекової ситуації представлено на рис. 4, показує, що на територіях макрорегіонів Тил та Опора перевагу мають альтернативи $V1$ та $V4$ порівняно з іншими варіантами. Для територій, розташованих ближче до зони бойових дій, найбільш вигідним є варіант $V3$, оскільки він демонструє найвищий рівень стійкості до впливу вибухової хвилі при порівнянні за ключовими критеріями безпеки.

Висновки

- У сучасних умовах актуальним стає застосування інтегральних моделей, які дозволяють комплексно оцінити альтернативи з урахуванням вагомості кожного критерію. Особливо важливим це є тоді, коли жоден варіант не домінує за всіма показниками, а рішення має бути ухвалене в зоні компромісу. Використання багатокритеріального аналізу та методів формалізації експертних оцінок забезпечує можливість об'єктивного вибору віконної конструкції, що водночас відповідає вимогам енергоефективності, функціональності та підвищеної захищеності житлових будівель з врахуванням безпекової ситуації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review Glass Struct Eng 7 , 693–710 (2022).
3. Ратушняк Г. С. Панкевич В.В.. Ідентифікація факторів, які визначають безпеку вікон при дії вибухової хвилі. // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, вип. 35, вип. 2, с. 42–48, Груд 2023
4. 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. 37, 2 (Чер 2025), 87–93. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-87-93>
5. Blast protection for windows. UN Department of Safety and Security : PSU Information Bulletin. 2021.
6. 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>
7. Suwen Chen, Xing Chen, Yujia Lu, Xin Guo, Siyi Yi, Yu Luo Towards blast safety of glass façades: Research advances and prospects, Thin-Walled Structures, Volume 212, 2025, 113213, ISSN 0263-8231, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113213>
8. 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>
9. О. Serdiuk In the first time, Ukrainian windows are certified according to the explosion resistance class https://okna.ua/en/news/20231006/in-the-first-time-ukrainian-windows/amp?utm_source=chatgpt.com
10. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель
11. ДБН В.2.2-15:2019 Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення
12. 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)
13. ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010 Конструкції будинків і споруд. Настанова щодо проектування й улаштування вікон та дверей
14. ДСТУ EN 14608:2021 Вікна. Визначення стійкості рами (EN 14608:2004, IDT)

REFERENCES

- [1] Ratushnyak, G. S., Pankevich, V. V., Pankevich, O. D., & Gumenchuk, A. E. (2025). Model for selecting window structures for building design, taking into account safety considerations. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 3, 17–25
- [2] Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review Glass Struct Eng 7 , 693–710 (2022).
- [3] Ratushnyak G. S., Pankevich V. V. Identification of factors determining window safety under the action of a blast wave // Modern technologies, materials and structures in construction, issue 35, issue 2, pp. 42–48, December 2023
- [4] Ratushnyak, G. S., Pankevich, V. V., Pankevich, O. D. Factors influencing the assessment of safety when choosing window designs. // Modern technologies, materials and structures in construction. 37, 2 (June 2025), 87–93. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-87-93>
- [5] Blast protection for windows. UN Department of Safety and Security : PSU Information Bulletin. 2021.
- [6] Basok B., Nedbaylo O., Davydenko D., Bepala N. Physical factors influencing the impact of explosions on transparent enclosing structures. Review of testing methods // Energy: economics, technology, ecology. No. 2 (2024) DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303106>
- [7] Suwen Chen, Xing Chen, Yujia Lu, Xin Guo, Siyi Yi, Yu Luo Towards blast safety of glass façades: Research advances and prospects, Thin-Walled Structures, Volume 212, 2025, 113213, ISSN 0263-8231, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113213>
- [8] 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>
- [9] О. Serdiuk In the first time, Ukrainian windows are certified according to the explosion resistance class https://okna.ua/en/news/20231006/in-the-first-time-ukrainian-windows/amp?utm_source=chatgpt.com
- [10] DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings
- [11] DBN V.2.2-15:2019 Buildings and structures. Residential buildings. Basic provisions
- [12] DSTU EN 13123-2:2006 Windows, doors, and shutters. Resistance to explosion. Classification and technical requirements. Part 2. Test range (EN 13123-2:2004, IDT)
- [13] DSTU-N B V.2.6-146:2010 Building and structure designs. Guidelines for the design and installation of windows and doors
- [14] DSTU EN 14608:2021 Windows. Determination of frame stability (EN 14608:2004, IDT)

Ратушняк Георгій Сергійович – к.т.н, професор, завідувач кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: ratushnyak@vntu.edu.ua ORCID 0000-0001-9656-5150,

Панкевич Володимир Вячеславович – PhD, старший викладач кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: pankevych@vntu.edu.ua ORCID 0000-0002-1929-8172

Панкевич Ольга Дмитрівна — к.т.н, доцент кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua ORCID 0000-0001-9391-3435

G. Ratushnyak
V. Pankevych
O. Pankevych

INTEGRATED APPROACH TO EVALUATING AND SELECTING WINDOW CONSTRUCTIONS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS, TAKING INTO ACCOUNT THE SAFETY SITUATION

Vinnitsia National Technical University

An integral approach to the evaluation and selection of window constructions for residential buildings under a variable security environment is proposed. The developed model combines classical partial criteria (energy efficiency, architectural and functional properties, market cost, and anti-burglary protection level) with a safety-related criterion—the resistance of window structures to blast-wave impact. The criterion weights are determined using a staged expert pairwise comparison procedure, incorporating a renormalization mechanism that reflects changes in the security context. For spatial risk assessment, a clustering framework is introduced that classifies territories (Rear / Support / Frontier / Boundary / Critical Zone) based on proximity to active combat lines or high-risk borders, closeness to potential targets of missile and bomb attacks, and the density of such objects within the surrounding area. The practical section illustrates the application of the model using five alternative window constructions (V1–V5), demonstrating varying suitability of these options for macro-regions with different levels of security risk.

The method is intended to support engineering decision-making in selecting window systems under evolving safety conditions. The integral approach ensures transparency of decision-making, enables justification of the selected option in design documentation, and provides flexibility for adapting to shifts in weighting priorities and changes in the security situation.

Keywords: window construction, residential building, protection, safety, blast wave, glass, integrated approach, multi-criteria analysis, model

Georgiy Ratushnyak - Candidate of Technical Science, Professor, Head of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: ratushnyak@vntu.edu.ua ORCID 0000-0001-9656-5150.

Volodymyr Pankevych - PhD, Senior Lecturer, Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: pankevych@vntu.edu.ua ORCID 0000-0002-1929-8172.

Olga Pankevych - Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia National Technical University, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua ORCID [0000-0001-9391-3435](https://orcid.org/0000-0001-9391-3435).