

## Розкриття закономірностей ефективних механічних характеристик стільникового листового полікарбонату легкоскидних конструкцій

С. В. Поздєєв, К. І. Мигаленко, В. М. Нуянзін, О. М. Землянський, Т. В. Костенко

*В середині виробничих приміщень можуть утворюватися вибухонебезпечні концентрації різних речовин. За наявності достатньої кількості кисню та джерела запалення така ситуація закінчується вибухом, який може призвести до руйнування будівельних конструкцій та будівлі в цілому. З метою захисту промислових будинків від можливих руйнувань внаслідок вибуху усередині приміщення здійснюють зміцнення й посилення стійкості несучих конструкцій.*

*Одним із дієвих способів захисту будівельних конструкцій від надлишкового тиску вибуху є застосування легкоскидних конструкцій. З метою розв'язання практичних завдань вибухозахисту промислових будинків і споруд необхідно однаковою мірою вміти підібрати площу та параметри легко скидних конструкцій. Крім того, для зниження виникаючих навантажень до безпечних величин необхідно правильно розрахувати несучі конструкції на динамічну стійкість при збереженні їх несучої здатності. Поставлена задача забезпечення захисту проти вибуху за допомогою безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами може бути вирішена шляхом комплексного врахування механічних властивостей стільникових полікарбонатних листів.*

*Проведені експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху. На основі отриманих результатів визначено ефективну жорсткість та критичне переміщення стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів. Встановлено, що для стільникових полікарбонатних листів товщиною 4-8 мм ефективна жорсткість лежить у межах 301–215 Н·м при цьому критичне переміщення країв становитиме 2,9–9,8 мм.*

*Запропоновано математичну модель, що враховує вплив геометричних розмірів та критичного значення прогину полікарбонатного листа, як гнучкого елемента огороження, на умови спрацювання легкоскидних конструкцій*

*Ключові слова: легкоскидні конструкції, полікарбонатний стільниковий лист, ефективні механічні характеристики, експериментально-розрахунковий метод*

### 1. Вступ

Статистичні дані [1, 2] показують, що на кожну тисячу пожеж та загорань припадають два випадки, які супроводжується вибухом (0,2 %). На кожні сто пожеж у промисловому секторі одна пожежа супроводжується вибухом (1,0 %). За умови, коли пожежа супроводжується вибухом, рівень соціально-економічних втрат набуває найбільших величин. Такий стан має тенденцію до збільшення з причини ущільнення вибухонебезпечних виробництв. Це най-

більш актуально у галузі енергетичних, паливопереробних, паливозберігаючих, хімічних підприємств а також підприємств агропромислового, харчового та деревообробного комплексів [3].

Для виробничих будівель, де можливі вибухи горючих сумішей, поряд із заходами для їхнього запобігання застосовуються заходи щодо захисту людей, устаткування й будівельних конструкцій у випадку виникнення вибуху усередині приміщення. Такий стан пояснюється тим, що утворення вибухонебезпечних концентрацій відбувається так швидко, що обслуговуючий персонал, як правило, не в змозі запобігти вибуху.

Більша швидкість поширення полум'я й висока температура, що створюється під час вибуху горючих сумішей у приміщенні, приводять до різкого підвищення тиску усередині будинку, руйнуванню елементів устаткування й будівельних конструкцій і зупинці виробництва. Основний збиток виробництву завдається за рахунок обвалення будівельних конструкцій. Аварії супроводжується травмуванням як обслуговуючого персоналу, так і працівників рятувальних підрозділів [4].

Створення умов, які у випадку вибуху запобігають руйнуванню елементів будівельних конструкцій, є необхідною умовою зменшення травматизму та матеріальних втрат. Дієвим способом захисту будівельних конструкцій від надлишкового тиску вибуху є використання легкоскридних конструкцій, в якості яких можуть бути використані засклені вікна.

Однієї із сучасних різновидів вікон є вікна з полікарбонату. У порівнянні зі звичайними різновидами, дані вікна виготовляються з полікарбонату, який здатний зберігати тепло на високому рівні, відмінно протистояти навіть найдужчим перепадам температури, а також є стійким до різноманітних ушкоджень. Багато фахівців радять використовувати полікарбонатні вікна в приміщеннях, в яких необхідно підвищити рівень звукоізоляції і збільшити кількість проникаючого світла.

Фактично, такий виріб, найчастіше, складається із пластикового, металевого, металопластикового, у рідких випадках, дерев'яного каркаса й вставленої в нього стільникового або монолітного полікарбоната. Таке вікно дуже схоже на звичайне, тільки замість скла – полікарбонат. У житлових приміщеннях полікарбонатні вікна почали використовуватися достатньо недавно. Дані вікна, у більшості випадків, не відкриваються. Їхнє застосування носить так званий декоративний характер.

Полікарбонат має таку ж прозорість, як і скло. По вазі, міцності та безпечним характеристикам монолітний полікарбонат краще звичайного скла. Вікна з полкарбонату робляться за принципом склопакета і можуть відкриватися. Єдиний недолік таких вікон – ціна. Монолітний полікарбонат для вікон виготовляється за спеціальною технологією, яка передбачає високий ступінь очищення полікарбонату від усіляких домішок, що надає матеріалу максимальну прозорість, у зв'язку із чим його ціна значно вище звичайного полікарбонату.

Незаперечними перевагами вікон з полікарбонату є те, що їх використання дозволяє в значній мірі зробити будівлю більш комфортною. Але, у той же час,

варто відзначити, що далеко не кожний виробник таких типів вікон може забезпечити досить високу якість своїх виробів.

Перспективним для виготовлення ЛСК є віконні системи зі стільникових полікарбонатних листів, зовнішній вигляд яких показаний на рис. 1.

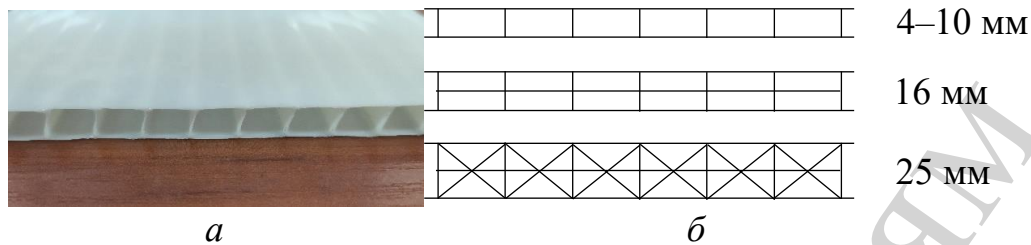


Рис. 1. Конструкція стільникових полікарбонатних листів: *а* – зовнішній вигляд; *б* – конструктивні особливості листів різної товщини

Застосування даного матеріалу дозволить багаторазово використовувати гнучкі елементи, що обгороджують, й скоротити трудові й матеріальні витрати на монтаж і установку.

В сучасному будівництві застосовуються різні будівельні матеріали, які можуть бути використанні в якості легкоскладних конструкцій, однак особливості їх застосування недостатньо досліджені. До таких матеріалів належать полікарбонатні стільникові листи. Таким чином, дослідження особливостей застосування полікарбонатних стільникових листів в якості легкоскладних конструкцій є досить актуальною задачею.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним з основних завдань у загальній проблемі вибухобезпеки є можливість визначати виникаючі навантаження, що діють на елементи конструкцій при вибуху горючих газо-, паро- і пилоповітряних сумішей усередині приміщення. Існуюча теорія горіння, вибуху й детонації горючих сумішей добре описує процеси, пов'язані з явищами вибухового горіння при їх протіканні у трубах та інших подібних просторах. В роботі [5] розглянуто аналітичні та числові методи прогнозування внутрішнього і зовнішнього тиску вибуху газоповітряних сумішей у великих приміщеннях, однак вибухи горючих сумішей у більших об'ємах, порівняно з об'ємами промислових будинків, на даний час ще вивчені недостатньо. У зв'язку із цим при розв'язку практичних завдань захисту будинків вибухонебезпечних виробництв від руйнувань слід приймати такі вихідні дані, які дозволять одержувати надійні результати щодо забезпечення вибухозахисту.

Основна ідея захисту промислових будинків при вибуху горючих сумішей усередині приміщення полягає в забезпеченні міцності й стійкості несучих конструкцій. В роботі [6] розглянуто використання спеціальних сталевих конструкцій та високоміцного армованого волокнами бетону. В якості методу для ослаблення вибухової хвилі досліджувалися перфоровані пластини [7, 8]. Такі підходи дозволяють знизити навантаження, яке виникає внаслідок вибуху. Огляд методів проектування та модернізації конструктивних елементів з метою

мінімізації наслідків вибуху проведено в [9]. Розглянуті методи не дозволяють зменшити тиск вибуху в усьому приміщенні. Їх доцільно використовувати для підвищення міцності і пластичності будівельних конструкцій, а також з метою зменшення кількості та розмірів уламків, які розлітаються під час вибуху.

Інший підхід полягає у руйнуванні або розкритті спеціальних легко скидних конструкцій (ЛСК) при мінімальних навантаженнях (імпульс, тиск) [10, 11]. Однак при розв'язку практичних завдань вибухозахисту будинків і споруджень необхідно вміти підібрати площу та параметри ЛСК і правильно розрахувати несучі конструкції на динамічну стійкість, зберігши при цьому несучу здатність. Для цього необхідно визначити навантаження, що виникають під час вибуху горючих сумішей усередині приміщень.

Математичну модель для оцінки максимальних значень надлишкового тиску під час вибухів водню та вуглеводнів розглянуто в роботі [12]. Запропонована авторами модель враховує геометрію об'єкту та характеристики вуглеводнів, що вибухають. Однак особливості побудови ЛСК в роботі не розглядаються.

В роботі [13] за допомогою чисельного моделювання було розглянуто вибух воднево-повітряного середовища в приміщенні. Проаналізовано вплив розмірів ЛСК на температуру вибуху, надлишковий тиск, швидкість повітряних потоків. Інші чинники, що впливають на процеси, які протікають під час вибухів в середині певних об'ємів, розглянуто в роботі [14]. Зокрема, проаналізовано вплив часу відкриття ЛСК на характеристики вибуху. Встановлено, що всередині приміщень максимальне значення тиску і час його зменшення має лінійну залежність від часу відкриття. Однак особливості конструювання ЛСК в роботі не досліджується.

Дослідження реакції прямокутних тонких пластин, які піддаються великим прогинам під час вибуху, досліджено в роботі [15]. Однак отримані результати не можуть бути використані для побудови ЛСК на основі стільникового полікарбонату з виходом із замків, оскільки досліджувалися пластини з нерухомими, затиснутими кромками.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що основна частина наукових досліджень спрямована на підвищення стійкості будівельних конструкцій до негативних до наслідків вибуху. Питання використання сучасних матеріалів в якості легкоскидних конструкцій висвітлено не достатньо. Також не проведено в повній мірі дослідження щодо застосування СПЛ в якості елемента легкоскидних конструкцій.

З іншого боку, для практичного використання виникає необхідність створення науково обґрунтованих підходів до проектування легко скидних конструкцій з СПЛ. Тому питання обґрунтування визначення конструктивних особливостей ЛСК з СПЛ є актуальною задачею. Висока надійність і незалежність розкриття ЛСК є основною вимогою, яка повинна виконуватися при виборі їх конструктивних параметрів.

### **3. Мета і задачі дослідження.**

Метою дослідження є розкриття закономірностей спрацьовування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами в

залежності від їх конструктивних параметрів в умовах вибуху під впливом динамічних навантажень.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху;

- на основі проведених експериментальних досліджень визначити ефективні характеристики деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів;

- з використанням отриманих ефективних характеристик деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів дослідити умови їх виходу із замків стандартного віконного профілю легкоскридних конструкцій, що улаштовані на їх основі.

#### **4. Методика дослідження поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами**

Основною ідеєю випробувань СПЛ для отримання їх ефективної жорсткості є прикладення розподіленого навантаження до СПЛ у рамі з віконного профілю ПВХ найбільш поширених розмірів при виготовленні систем ЛСК, що імітує вплив надлишкового тиску вибуху. Тобто мають бути випробувані натурні зразки, розміри яких рівні, або наближені до розмірів реальних елементів систем ЛСК. При цьому мають бути виміряні силові та деформаційні показники СПЛ, закріплених у рамах у такий же самий спосіб як-у реальних системах ЛСК.

Для здійснення даних випробувань застосовувалася експериментальна установка, що складалася із закріплювальної рами, навантажувального вузла та вимірювальної інфраструктури. (рис. 2)

На рис. 2 наведена схема проведення вимірювань у випробувальній установці та схема розташування сталеві пластина на СПЛ, встановлену у раму з віконного профілю ПВХ.

При випробуваннях у рамах закріплювалися СПЛ товщиною 4 мм, 6 мм, 8 мм. СПЛ однієї і тієї ж товщини випробувалися по два рази.

Зразки віконних рам з ПВХ профілю навантажувалися горизонтальним навантаженням. Горизонтальне навантаження прикладалося через розподільчу систему.

Навантаження віконних рам з ПВХ профілю з змонтованим стільниковим полікарбонатним листом товщиною 4 мм, 6 мм та 8 мм здійснюється ручною лебідкою. Вимірювання навантаження здійснюється за допомогою динамометра ДПУ-0,5-2. Для вимірювання деформацій застосовувався прогиномір годинникового типу 6ПАО з ціною поділки 0.01 мм, який встановлювався в геометричному центрі полікарбонатного листа (рис. 2).

Випробування СПЛ у рамах з ПВХ віконного профілю відбувається у такій послідовності. У раму за допомогою штапиків встановлюється СПЛ товщиною 4 мм, як показано на рис. 2. Переміщенням силової лебідки прикладається зусилля на навантажувальний циліндричний кронштейн. Покроково прикладаючи зусилля, вимірюється його величина за допомогою динамометра ДПУ-0,5-2 і

величина максимального прогину за допомогою прогиноміру годинникового типу 6ПАО. Випробування закінчується при появі ознак виходу країв СПЛ із вузла кріплення рам. У даний момент фіксується прикладене навантаження та максимальна деформація на момент виходу країв СПЛ з вузлів кріплення. Після цього у рамках фіксується СПЛ з такою ж самою товщиною і експеримент повторюється у тій же самій послідовності ще один раз. Такі ж самі два однакових випробування мають бути повторені для зразків СПЛ з товщиною 6 мм та 8 мм.

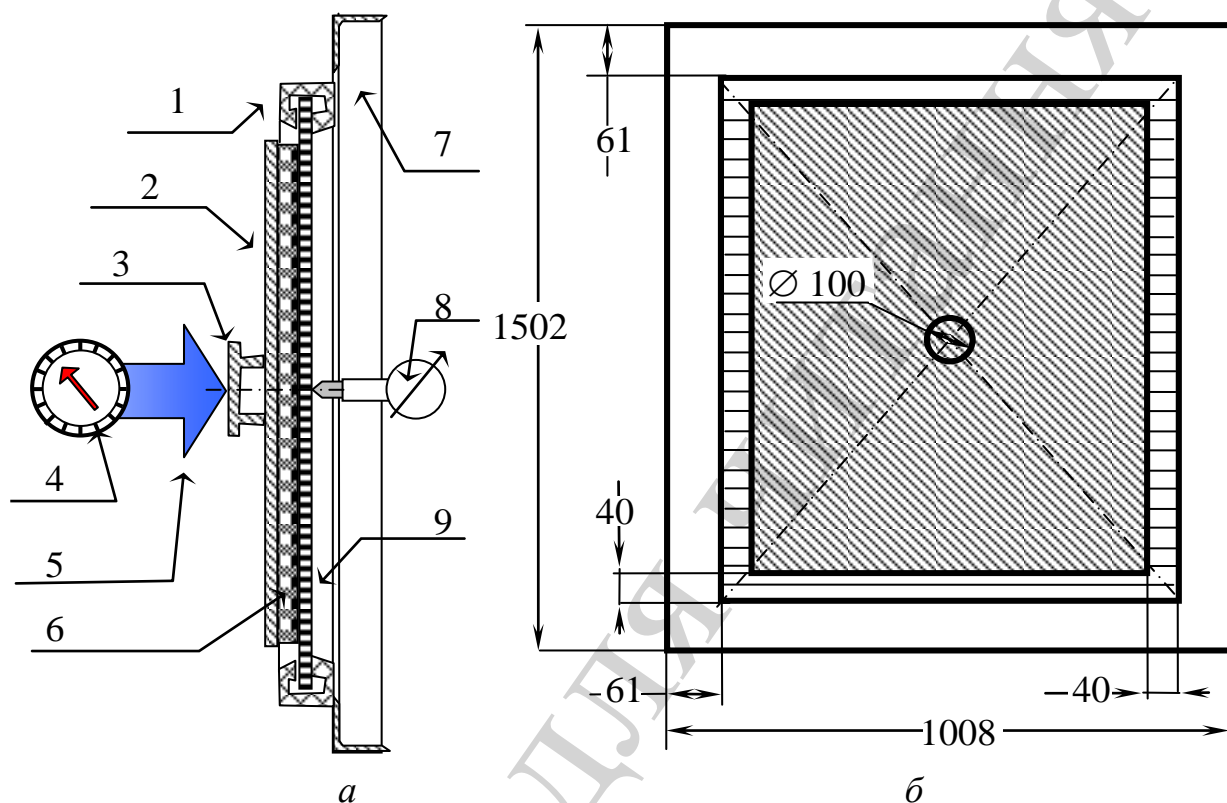


Рис. 2. Конструктивна схема установки для випробувань стільникових полікарбонатних листів щодо впливу надлишкового тиску вибуху: *a* – схема проведення вимірювань у випробувальній установці: 1 – рама елемента ЛСК, 2 – сталевий лист, 3 – навантажувальний кронштейн, 4 – динамометр, 5 – навантаження, 6 – прошарок з мінеральної вати, 7 – опорна рама, 8 – індикатор годинникового типу, 9 – стільниковий полікарбонатний лист; *б* – схема розташування сталевий пластины на СПЛ

Необхідні дані мають бути визначені за допомогою експериментальних досліджень. Для здійснення експериментальних досліджень була розроблена методика, що заснована на основних принципах вимірювання вітрового навантаження на віконні системи, що містяться у стандартах ДСТУ Б В.2.6-89:2009 та ДСТУ Б В.2.6-15:2011, чинних в Україні.

Основною ідеєю випробувань СПЛ для експериментального визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення є проведення випробувань при поступовому прикладанні сили до СПЛ закріпленого у фрагменті рами до виходу краю СПЛ з вузла кріплення.

При цьому величина зусилля, що фіксується, вважається величиною сили тертя, яка утримує краї СПЛ у вузлах кріплення.

Для здійснення даних випробувань застосовувалася експериментальна установка, що складалася із закріплювальної рами, навантажувального вузла та вимірювальної інфраструктури (табл. 1).

Таблиця 1

Засоби вимірювальної та випробувальної техніки

Назва засобів вимірювальної техніки	Заводський номер	Дата повірки		№ свідоцтва
		останньої	наступної	
Випробувальна машина Fm-1000	без номера	13.06.2016р.	13.06.2017р	Ua/04/160613/230812
Динамометр	51341	22.06.16	22.06.17	39-02/0905

На рис. 3 наведені схеми проведення вимірювань у випробувальній установці.

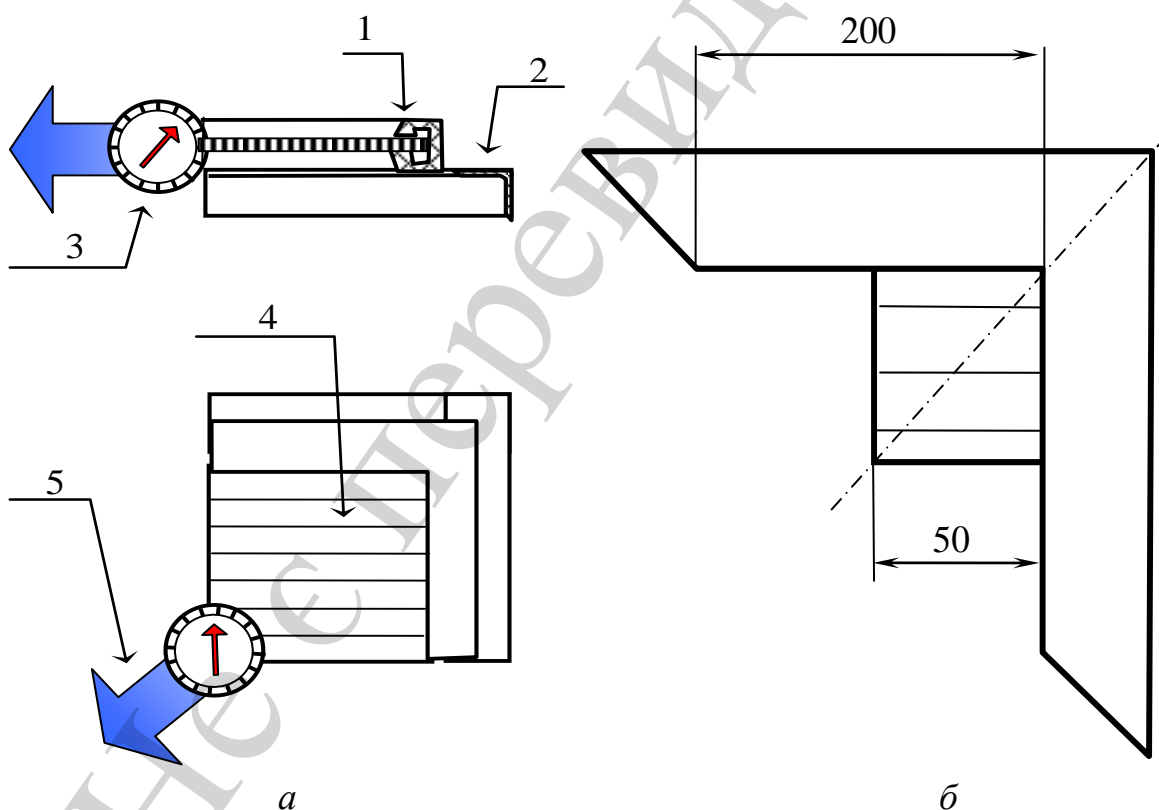


Рис. 3. Конструктивні схеми: *а* – установки для випробувань стільникових полікарбонатних листів щодо розподілених сил тертя: 1 – фрагмент рами елемента ЛСК, 2 – опорна рама, 3 – динамометр, 4 – фрагмент стільникового полікарбонатного листа, 5 – навантаження; *б* – зразку для випробувань стільникових полікарбонатних листів щодо впливу надлишкового тиску вибуху

Визначення здатності утримання полікарбонатного листа штапиками здійснювалось на кутових з'єднаннях розмірами 200×200 мм з штапиком товщиною 36 мм та довжиною 114 мм. Зусилля витягування полікарбонатного листа прикладалось під кутом 45° до профілю кутового з'єднання в площинності рами.

Зусилля витягування визначали для зразків полікарбонатного листа з загальною довжиною прижиму 100 мм (50×50 мм) та 150 мм (75×75 мм).

Зразки віконних рам з ПВХ профілю навантажувалися горизонтальним навантаженням. Горизонтальне навантаження прикладалося через розподільчу систему.

Навантаження віконних рам з ПВХ профілю з змонтованим стільниковим полікарбонатним листом товщиною 4 мм; 6 мм; та 8 мм здійснюється ручною лебідкою. Вимірювання навантаження здійснюється за допомогою динамометра ДПУ-0,5-2.

Випробування СПЛ у фрагментах рам з ПВХ віконного профілю щодо експериментального визначення розподілених сил тертя, що утримують СПЛ у вузлах кріплення відбувається у такій послідовності. У раму за допомогою штапиків встановлюється фрагмент рами із зразком СПЛ товщиною 4 мм та розмірами 50×50 мм, як показано на рис. 3. Переміщенням силової лебідки прикладається зусилля на край зразку СПЛ (рис. 3, б). Покроково прикладаючи зусилля, вимірюється його величина за допомогою динамометра ДПУ-0,5-2. Випробування закінчується при появі ознак виходу країв СПЛ із вузла кріплення рам. У даний момент фіксується прикладене навантаження на момент виходу країв СПЛ з вузлів кріплення. Після цього у рамах фіксується СПЛ з такою ж самою товщиною та розмірами і експеримент повторюється у тій же самій послідовності ще один раз. Такі ж самі два однакових випробування мають бути повторені для зразків СПЛ з товщиною 4 мм та розмірами 75×75 мм. Подібні випробування повторюються для зразків 6 мм та 8 мм із розмірами 50×50 мм та 75×75 мм.

## **5. Експериментальне дослідження поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами**

У результаті проведення випробувань були отримані дані щодо деформування СПЛ у рамах з ПВХ віконного профілю. Отримані дані наведені у табл. 2.

Аналізуючи дані, наведені у табл. 2, видно що випробування були проведені якісно, оскільки дані отримані у результаті різних випробувань однакових зразків мають подібні значення. Така картина спостерігається як для даних щодо деформації зразків, так і для даних щодо силових показників, коли спостерігався вихід країв СПЛ з вузлів кріплення ПВХ віконного профілю.

На рис. 4 наведені графіки залежностей деформації прогину серединної точки СПЛ від прикладеного навантаження до кронштейну силового вузла.

Аналіз отриманих результатів на рис. 4 також показує, що якість експериментальних даних є задовільною, оскільки розбіжність між ними при умові проведення однакових експериментів є незначною.

Важливою особливістю графіків є те, що отримані криві відтворюють лінійну залежність. Це означає що деформування СПЛ упритул до виходу їх країв із вузлів кріплення відбувається у області виконання закону Гука і для математичного описання процесів деформування СПЛ можна застосувати основний математич-



ний апарат теорії пружності пластинок і оболонок. Також можна зазначити, що експеримент підтверджує можливість використання СПЛ в якості елемента ЛСК, які спрацьовують внаслідок виходу краю СПЛ з вузла кріплення.

Таблиця 2

Дані щодо деформаційних та силових характеристик стільникових полікарбонатних листів у момент виходу їх країв із вузлів кріплення

№ зразка	Товщина СПЛ, мм	Площа СПЛ, м <sup>2</sup>	Максимальна деформація, мм/кгс	Горизонтальне навантаження	
				на фрагмент, кгс (Н)	кгс/м <sup>2</sup> (Па)
1	4,00	1,285	7,58/50,00	75,00 (735,75)	58,37 (572,57)
2	4,00	1,285	6,55/50,00	72,00 (706,32)	56,03 (549,67)
3	6,00	1,285	23,64/155,00	184,00 (1805,04)	143,19 (1404,70)
4	6,00	1,285	23,82/155,00	190,00 (1863,9)	147,86 (1450,51)
5	8,00	1,285	31,05/185,00	225,00 (2207,25)	175,10 (1717,70)
6	8,00	1,285	30,83/185,00	220,00 (2158,2)	171,21 (1679,53)

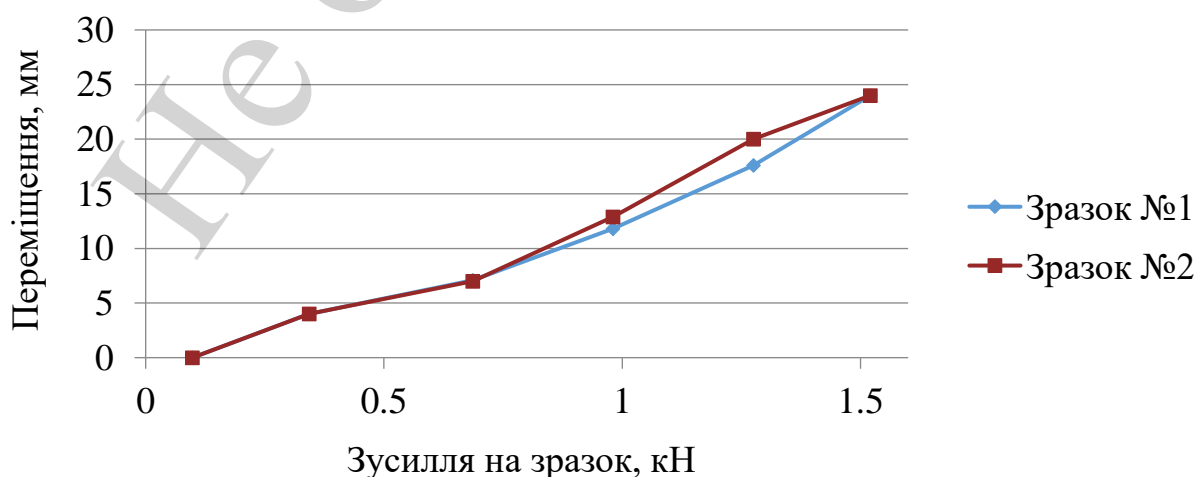
На рис. 5 наведені графіки отриманих залежностей математичного очікування та абсолютної експериментальної похибки деформації прогину  $w_y$  середньої точки ФПЛ в залежності від прикладеного навантаження  $P$ , що були отримані у ході експерименту.

Графіки на рис. 5 підтверджують коректність введення гіпотези щодо лінійності та пружності деформацій у залежності від прикладеної сили та підтверджують, що у результаті проведених експериментів отримано якісні дані.

Результати випробувань кутових з'єднань з полікарбонатними листами товщиною 4, 6 та 8 мм наведено у табл. 3.

Для визначення ефективної жорсткості СПЛ, що утримують СПЛ у вузлах кріплення рам застосовуються розрахункові схеми, наведені на рис. 6, 7 [11].

Зважаючи на умови прикладення навантаження під час проведення експерименту (рис. 2), буда побудована розрахункова схема прикладення навантаження, наведена на рис. 8.



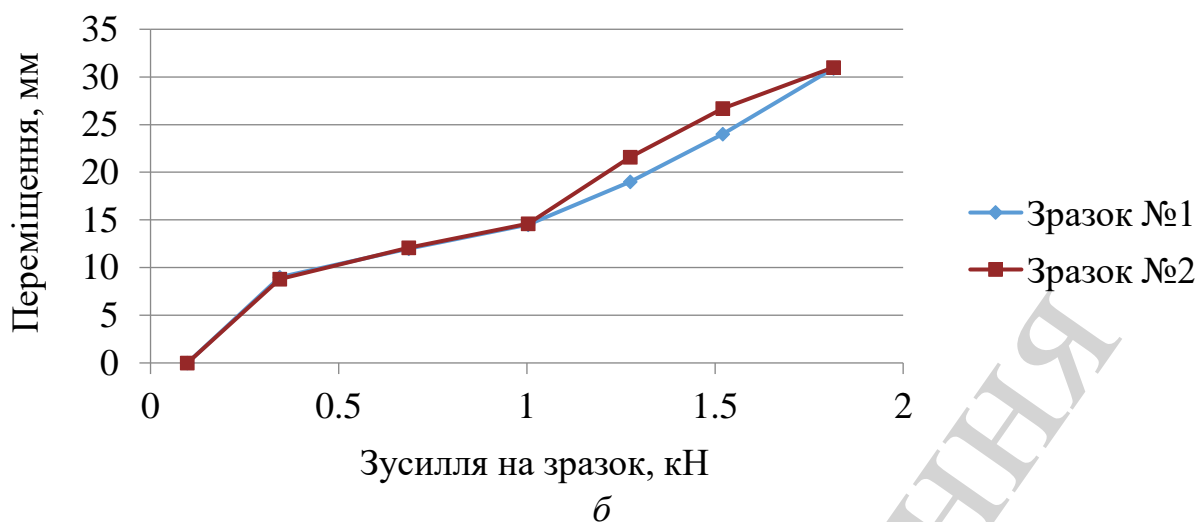


Рис. 4. Графіки залежності переміщення від навантаження для зразків з полікарбонатними листами товщиною: *a* – 6 мм; *б* – 8 мм

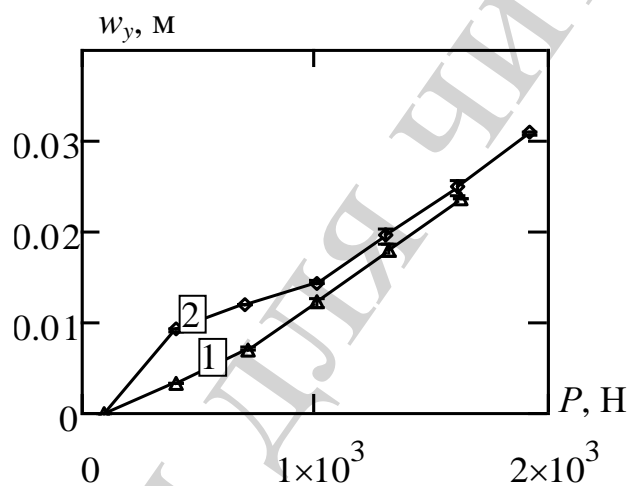


Рис. 5. Графіки математичного очікування та абсолютної експериментальної похибки максимального прогину стільникових полікарбонатних листів із різною товщиною в залежності від прикладеного навантаження: 1 – товщина 6 мм; 2 – товщина 8 мм

Таблиця 3

Результати визначення сил утримання стільникових полікарбонатних листів у вузлах кріплення рам

№ зразка	Товщина полікарбоната, мм	Зусилля витягування, кгс (Н)	
		100 мм	150 мм
1	4,00	3,75 (36,79)	4,6 (45,13)
2	4,00	3,75(36,79)	4,7 (46,11)
3	6,00	7,5 (73,58)	8,2 (80,44)
4	6,00	7,5 (73,58)	8,1 (79,46)
5	8,00	11,5 (112,82)	14,2 (139,3)
6	8,00	11,8 (115,76)	14,5 (142,25)

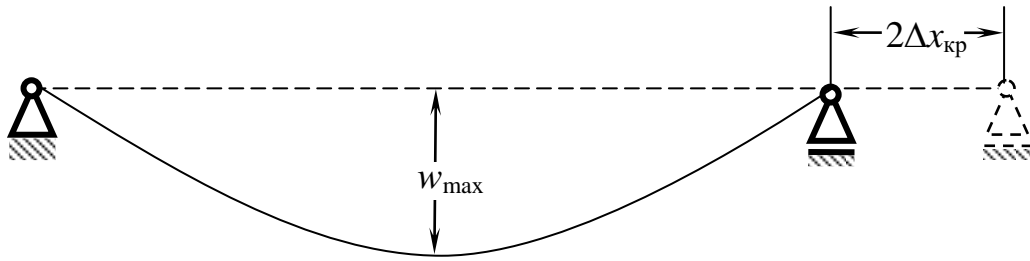


Рис. 6. Розрахункова схема деформування стільникового полікарбонатного листа у рамі з віконного профілю до визначення критичного переміщення його кінця

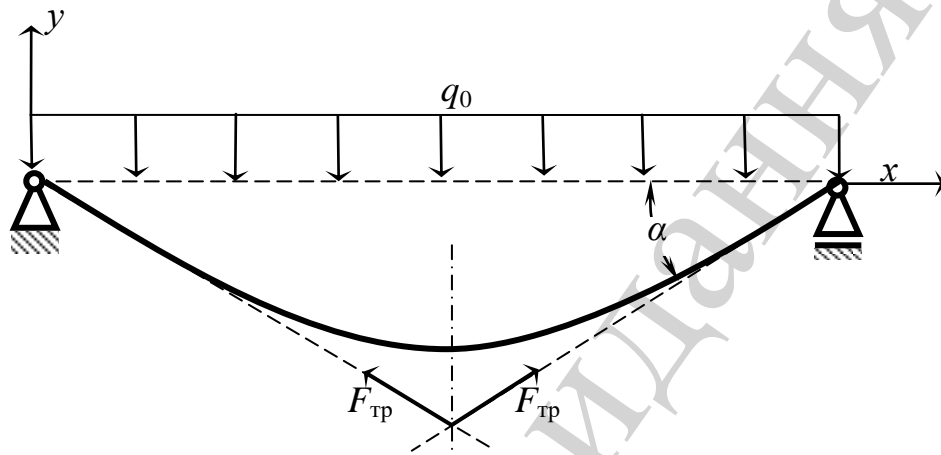


Рис. 7. Розрахункова схема силової взаємодії у стільниковому полікарбонатному листі у з рамі віконного профілю в умовах дії надлишкового тиску вибуху при врахуванні сил тертя у вузлах закріплення

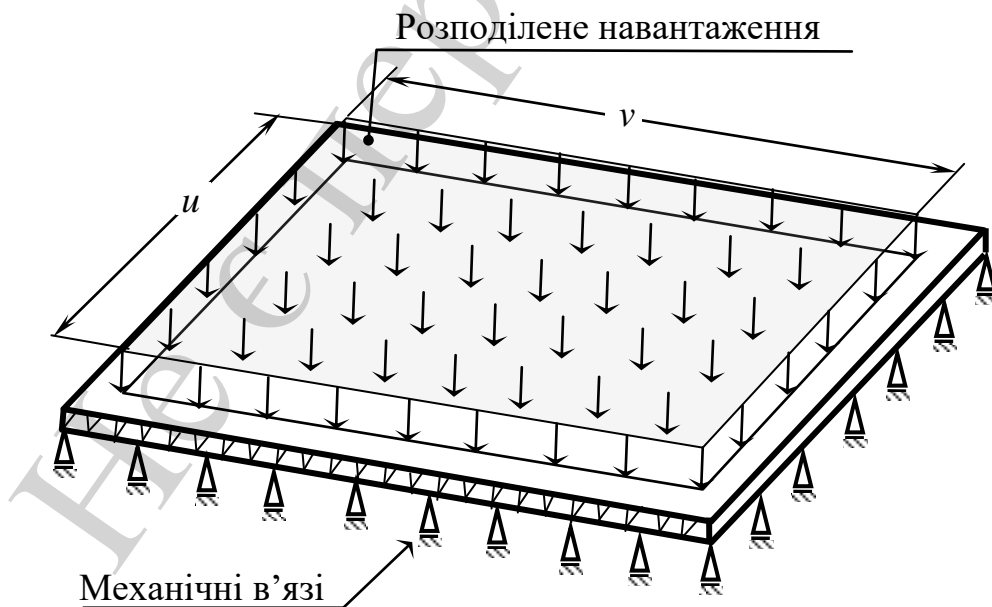


Рис. 8. Розрахункова схема прикладення навантаження в експериментальній установці

## 6. Визначення ефективних характеристик деформування СПЛ та умов виходу із замків

Для визначення розрахункових характеристик: ефективної жорсткості та ефективного критичного переміщення країв СПЛ, маємо скласти рівняння рівноваги, використовуючи рівняння [11]:

$$\sum Y_i = q_0 \cdot a \cdot b - 2(F_{\text{тр}}^x \sin \alpha + F_{\text{тр}}^z \sin \beta) - Q_y = 0, \quad (1)$$

де  $q_0$  – надлишковий тиск вибуху, Па;  $a$  – найменший габаритний розмір проєму рами, м;  $b$  – найбільший габаритний розмір проєму рами, м;  $F_{\text{тр}}^x$ ,  $F_{\text{тр}}^z$  – сили тертя, що утримують кінці СПЛ у вузлі кріплення вздовж вісі  $x$  та вісі  $z$  відповідно, Н;  $\alpha$ ,  $\beta$  – кути нахилу дотичних до пружної лінії згину СПЛ відповідно з найбільшої та найменшої сторін прорізу рами елемента системи ЛСК, рад;  $Q_y$  – поперечна сила у точці на перетині діагоналей прорізу рами секції системи ЛСК, Н.

При цьому, розрахункова схема, наведена на рис. 7, зумовлює інший запис для визначення силу опору СПЛ за рахунок пружних внутрішніх:

$$Q_y = \frac{w_{\text{max}} \pi^6 D \cdot u \cdot v}{16} \times \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{n\pi v}{2b}}{m \cdot n \cdot \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \right]^{-1}, \quad (2)$$

де  $u=806$  мм,  $v=1300$  мм – відповідно найменший та найбільший розміри розподіленого навантаження, що прикладене до СПЛ в даному випадку співпадають із розмірами навантажувальної пластини випробувальної установки (рис. 2).

Для певного випадку при конкретних значеннях максимального прогину та відповідного йому значення прикладеного зусилля, згідно із рис. 7, 8, записується рівняння рівноваги, що має такий вигляд:

$$P_i - \frac{w_{i\text{max}} \pi^6 uvD}{16 \cdot \Omega} - 2q_{\text{тр}} \Theta_i = 0, \quad (3)$$

де множники  $\Omega$  та  $\Theta$  визначаються за виразами:

$$\Omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{n\pi v}{2b}}{m \cdot n \cdot \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2},$$

$$\Theta_i = \frac{b\pi w_{i\max}}{\sqrt{a^2 + \pi^2 w_{i\max}^2}} + \frac{a\pi w_{i\max}}{\sqrt{b^2 + \pi^2 w_{i\max}^2}}. \quad (4)$$

Всі величини є числовими параметрами, а ефективні характеристики  $D$  та  $q_{\text{тр}}$ , які необхідно визначити, входять у рівняння для визначення параметрів напружено-деформованого стану СПЛ як лінійні характеристики. Для їх визначення можна скласти систему з двох лінійних рівнянь, використовуючи отримані експериментальні дані. За експериментальними даними для СПЛ товщиною 4 мм можна скласти максимум два рівняння. Для СПЛ 6 мм та 8 мм за експериментальними даними можна скласти 6 та 7 рівнянь, що відповідає кількості експериментальних точок, які наведено на рис. 4.

Перед виходом кінців СПЛ утримуюча сила у вузлі кріплення стримує їх переміщення. При досягненні силами тертя критичного значення відбувається рух кінців СПЛ, що призводить до виходу з вузла кріплення.

Для визначення ефективної жорсткості системи шляхом перетворення виразу (2) був записаний вираз, поданий нижче:

$$D = \frac{16\Omega(P_{\text{кр}} - 2q_{\text{тр}}\Theta_{\text{кр}})}{w_{\text{кр}\max} \nu \pi^6}, \quad (5)$$

де  $q_{\text{тр}}$  – максимальна утримуюча сила тертя, що визначена експериментально (табл. 2);  $P_{\text{кр}}$  – критична сила виходу країв СПЛ із вузла кріплення, що визначена експериментально (табл. 2);  $\Theta_{\text{кр}}$  – параметр, який визначений за критичним значенням прогину  $w_{\text{кр}\max}$  при використанні виразу:

$$\Theta_{\text{кр}} = \frac{b\pi w_{\text{кр}\max}}{\sqrt{a^2 + \pi^2 w_{\text{кр}\max}^2}} + \frac{a\pi w_{\text{кр}\max}}{\sqrt{b^2 + \pi^2 w_{\text{кр}\max}^2}}. \quad (6)$$

Критичне значення прогину визначається шляхом лінійної екстраполяції за залежностями максимального прогину від прикладеного навантаження, графіки яких наведені на рис. 7, 8. Схема проведення екстраполяції наведена на рис. 9.

При використанні формул (5) та (6) необхідно визначити основні геометричні та розрахункові параметри. Дані параметри були визначені для всіх типів СПЛ. Визначені параметри для реалізації формул (5) та (6) наведені у табл. 4.

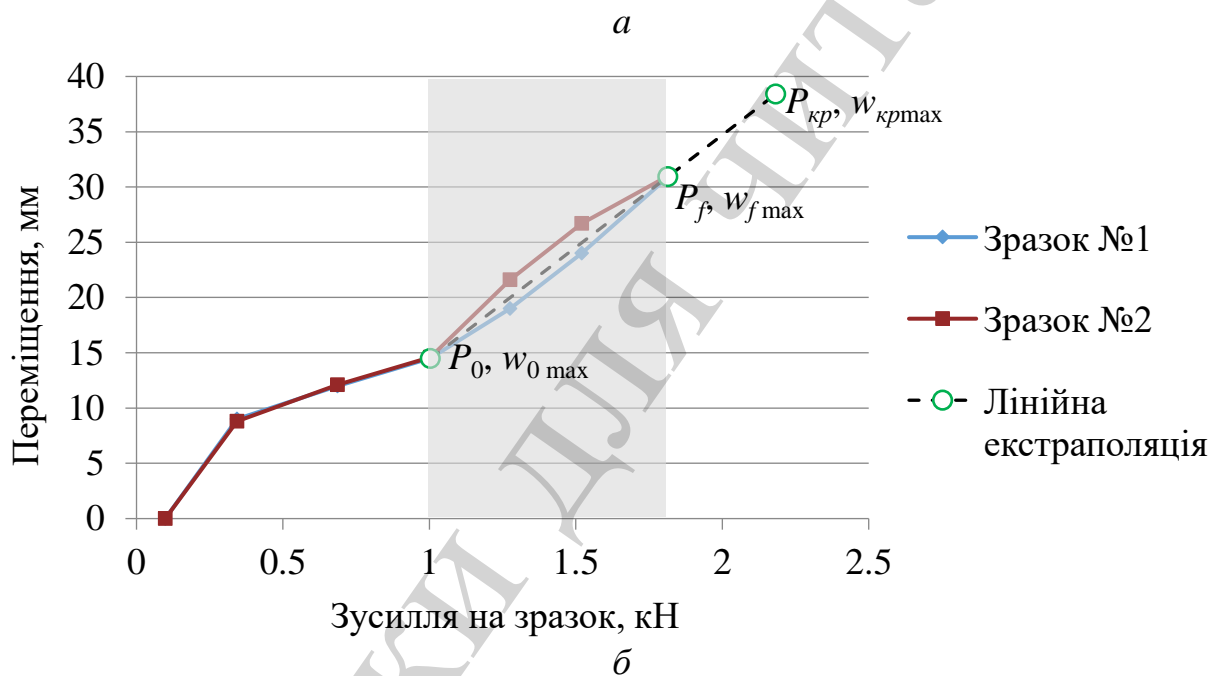
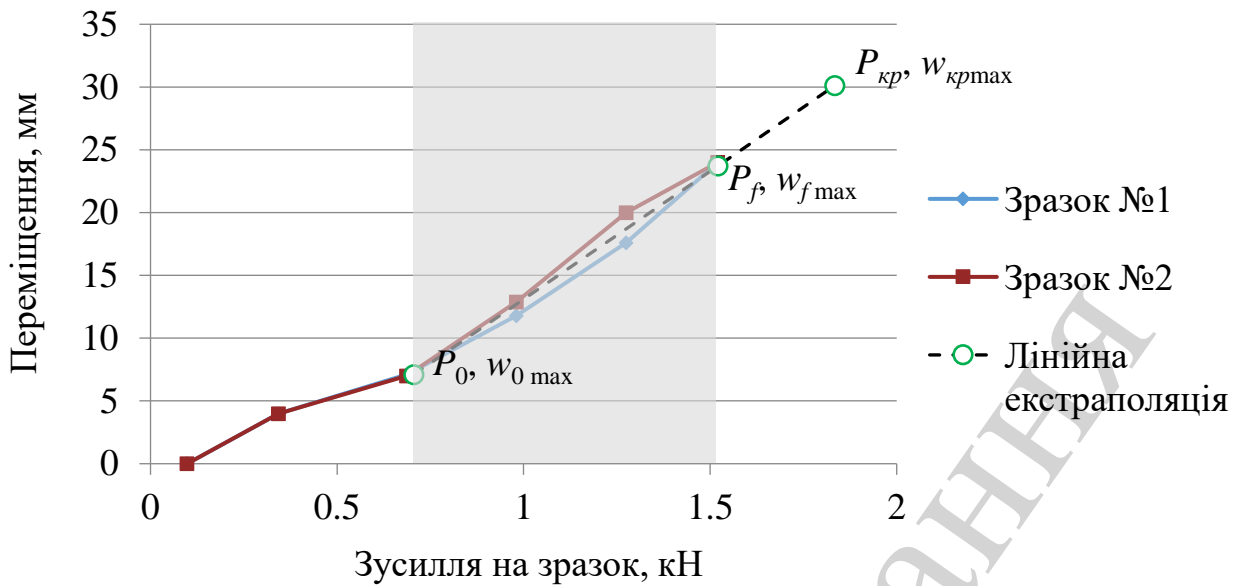


Рис. 9. Схеми вибору експериментальних точок для визначення ефективних параметрів для стільникових полікарбонатних листів: *a* – 6 мм; *б* – 8 мм

Таблиця 4

Розрахункові параметри для визначення ефективних характеристик стільникових полікарбонатних листів

Товщина СПЛ, <i>h</i> , мм	Параметр													
	<i>a</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>u</i> , мм	<i>v</i> , мм	$w_{0 \max}$ , мм	$w_{f \max}$ , мм	$P_0$ , кН	$P_f$ , кН	$P_{кр}$ , кН	$w_{кр \max}$ , мм	$q_{тр}$ , кН/м	$\Theta_{кр}$	$\Omega$ , м <sup>3</sup>	
4					3.533	7.065	0.294	0.49	0.721	11.228	0.336	0.077		
6	886	1380	806	1300	7.11	23.73	0.706	1.521	1.834	30.113	0.634	0.207	0.318	
8					14.47	30.94	1.004	1.815	2.183	38.413	1.041	0.263		

Використовуючи розрахункові дані, отримані за формулою (5) та наведені у табл. 4, була визначена ефективна жорсткість СПЛ із різною товщиною. Також при застосуванні формули (7) було визначено критичне переміщення краю СПЛ у вузлі кріплення [11]:

$$\Delta x_{кр} = 0.25\sqrt{36a^2 + 16a\pi w_{max} + \pi^2 w_{max}^2} - 1.5a - 0.25\pi w_{max}. \quad (7)$$

Отримані дані наведені у табл. 5.

Таблиця 5

Ефективні характеристики стільникових полікарбонатних листів для розрахунку конструктивних параметрів легкоскридних конструкцій на їх основі

Ефективний параметр	Товщина стільникових полікарбонатних листів		
	4 мм	6 мм	8 мм
Ефективна жорсткість, $D$ , Н·м	301.064	263.595	215.042
Критичне переміщення, $\Delta x_{кр}$ , мм	2.915	7.708	9.773

Отримані ефективні характеристики для СПЛ можуть бути використані для розробки методики конструктивних параметрів ЛСК на їх основі.

## 7. Обговорення результатів експериментально розрахункового визначення ефективних механічних характеристик стільникових полікарбонатних листів

Особливістю даного дослідження є те, що на сьогоднішній день не проведено в повній мірі дослідження щодо застосування СПЛ в якості елемента легкоскридних конструкцій. Задачею даної роботи було визначення конструктивних параметрів ЛСК з СПЛ з метою забезпечення високої надійності і незалежності розкриття ЛСК.

Перевагою досліджень, що були проведені в цій роботі, є виконання саме експериментального дослідження. В ході проведених робіт було розроблено методику проведення випробувань СПЛ за допомогою експериментальної установки, що складалася із закріплювальної рами, навантажувального вузла та вимірювальної інфраструктури, відповідно до рис. 2, 3. Під час експериментального методу випробувань СПЛ для визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення, є поступове прикладання сили до СПЛ, закріпленого у фрагменті рами до виходу краю СПЛ з вузла кріплення. Величина зусилля, що фіксується, вважається величиною сили тертя, яка утримує краї СПЛ у вузлах кріплення.

Аналіз експериментальних даних (табл. 2) показав, що дані, які були отримані в результаті різних випробувань однакових зразків, мають подібні значення. Це спостерігається як для даних щодо деформації зразків, так і для даних щодо силових показників, коли спостерігався вихід країв СПЛ з вузлів кріплення ПВХ віконного профілю. Вищезазначене свідчить про високу якість проведених випробувань.

Експериментально-розрахунковий метод дозволив визначити характеристики стільникових полікарбонатних листів для розрахунку конструктивних параметрів легкоскридних конструкцій на їх основі (табл. 5). Це дозволяє вирішити проблему, поставлену в роботі, та забезпечити високий рівень надійності і незалежності розкриття ЛСК. Розроблений експериментально-розрахунковий метод можна використовувати тільки за умови, що деформації гнучкого огороджувального елемента у легкоскридних конструкціях із подібними конструктивними схемами залишаються пружними і гнучкими.

Отримані в роботі дані можуть бути використані для розробки методики конструктивних параметрів ЛСК на їх основі та при прогнозуванні спрацювання СПЛ у ЛСК, що є перспективним напрямком подальших досліджень.

## 8. Висновки

1. Для визначення ефективної гнучкості та критичного переміщення проведені експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огороджувальними елементами під впливом статичних навантажень, що імітує вплив динамічних навантажень при вибуху. У результаті чого було показано, що деформування гнучких елементів до їх виходу із замків профілю відбувається у пружній області і це дозволяє для визначення ефективних пружних характеристик полікарбонатних стільникових листів застосувати теорію пластинок і оболонок.

2. Було розроблено розрахункову методику визначення ефективної гнучкості і критичного переміщення країв СПЛ на основі проведених експериментальних досліджень переміщень та відповідного тиску, прикладеного до СПЛ, з використанням запропонованої математичної моделі теорії пружних пластинок та оболонок. Ефективна гнучкість та критичне переміщення використані як параметри, що дозволяють комплексне описання напружено-деформованого стану СПЛ у легкоскридних конструкціях із стандартним віконним профілем як пружної системи, а розроблена методика дозволила їх визначити за допомогою запропонованої математичної моделі.

3. Проведене визначення ефективної гнучкості та критичного переміщення країв СПЛ на основі отриманих експериментальних даних. Для діапазону товщини СПЛ від 4 мм до 8 мм отримана ефективна гнучкість складала від 200 Н·м до 300 Н·м. Встановлено, що величина критичного переміщення країв СПЛ лежить в межах від 3 мм до 10 мм.

## Література

1. Травматизм на виробництві в Україні: національний профіль протягом 2009–2013 років. Інформаційно-аналітична профспілкова доповідь.
2. Хохотва, О. І. (2010). Про стан промислової безпеки та охорони праці. Охорона праці, 12, 7–8.
3. Migalenko, K., Nuianzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (91)), 31–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121727>



4. Kostenko, V., Kostenko, T., Zemlianskiy, O., Maiboroda, A., Kutsenko, S. (2017). Automatization of individual anti-thermal protection of rescuers in the initial period of fire suppression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (89)), 4–11. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109484>
5. Li, J., Hao, H. (2017). Internal and external pressure prediction of vented gas explosion in large rooms by using analytical and CFD methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 367–381. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.002>
6. Christian, A., Chye, G. O. K. (2014). Performance of Fiber Reinforced High-strength Concrete with Steel Sandwich Composite System as Blast Mitigation Panel. *Procedia Engineering*, 95, 150–157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.174>
7. Draganić, H., Gazić, G., Varevac, D. (2019). Experimental investigation of design and retrofit methods for blast load mitigation – A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 190, 189–209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.088>
8. Alberdi, R., Przywara, J., Khandelwal, K. (2013). Performance evaluation of sandwich panel systems for blast mitigation. *Engineering Structures*, 56, 2119–2130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.021>
9. Niollet, J. E., Yuen, S. C. K., Nurick, G. N. (2015). A Study to Assess the Use of Cylindrical Bars as Blast Barriers. *International Journal of Protective Structures*, 6 (2), 263–286. doi: <https://doi.org/10.1260/2041-4196.6.2.263>
10. Орлов, Г. Г. (1987). Легкосбрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий. М.: Стройиздат, 200.
11. Pozdieiev, S., Pidgoretskiy, Y., Nekora, O., Sidnei, S., Tyshchenko, O. (2018). Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 298. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19808>
12. Sinha, A., Wen, J. X. (2019). A simple model for calculating peak pressure in vented explosions of hydrogen and hydrocarbons. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (40), 22719–22732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.213>
13. Zhang, S., Zhang, Q. (2018). Effect of vent size on vented hydrogen-air explosion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (37), 17788–17799. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.194>
14. Pang, L., Hu, Q., Zhao, J., Lv, P., Sun, S., Yang, K. (2019). Numerical study of the effects of vent opening time on hydrogen explosions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (29), 15689–15701. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.175>
15. Feldgun, V. R., Yankelevsky, D. Z., Karinski, Y. S. (2016). A nonlinear SDOF model for blast response simulation of elastic thin rectangular plates. *International Journal of Impact Engineering*, 88, 172–188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.09.001>