

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Підгорецький Юрій Юрійович**

УДК 624.012

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ  
ПОВЕДІНКИ ГНУЧКИХ ПРОЗОРИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
БЕЗІНЕРЦІЙНИХ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА УМОВ ВИБУХУ**

Спеціальність – 261 «Пожежна безпека»  
Галузь знань – 26 «Цивільна безпека»

Подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на джерело

\_\_\_\_\_ **Ю. Ю. Підгорецький**

Науковий керівник: **Поздєєв Сергій Валерійович,**  
доктор технічних наук, професор,  
головний науковий співробітник інституту

Черкаси – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Підгорецький Ю. Ю.* Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів безінерційних легкоскидних конструкцій за умов вибуху. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, 2021.

**Актуальність теми дослідження.** Індустріально-промислова база України охоплює численну кількість підприємств із підвищеною вибухопожежною небезпекою, що потребують застосування спеціальних інженерних заходів для захисту людей і матеріальних цінностей від небезпечних факторів вибуху. Одне з найбільш ефективних інженерних рішень – влаштування легкоскидних конструкцій, які дають змогу швидко знижувати надлишковий тиск вибуху до безпечних величин. Крім визначення необхідної площі огороження легкоскидних конструкцій, потрібно їх удосконалити через застосування гнучких огорожувальних елементів на основі полімерних матеріалів, що вможливають їх багаторазове застосування, на відміну від скляного огороження. Використання легкоскидних конструкцій із таким устроєм обмежене, з огляду на відсутність науково обґрунтованих розрахункових методів їх проектування. Виявлення закономірностей залежності параметрів спрацьовування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами від їхніх конструктивних параметрів – актуальне завдання, результати виконання якого могли б послугувати підґрунтям для створення інженерних методик проектування безінерційних ЛСК із гнучкими елементами.

**Ідея роботи** полягає у забезпеченні належного захисту проти вибуху за допомогою безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами шляхом розроблення розрахункової методики їх проектування.

**Об'єкт дослідження** – процеси деформування гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умови їх спрацьовування під впливом надлишкового тиску вибуху.

**Предмет дослідження** – закономірності процесів деформування гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умови їх спрацювання залежно від їх конструктивних параметрів: товщини, розмірів прорізів, фізико-механічних властивостей матеріалів та нормованих параметрів імовірного вибуху.

**Мета роботи** полягає у розкритті закономірностей поведінки гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умов їх спрацювання під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху залежно від їх конструктивних параметрів як підґрунтя щодо розроблення відповідної розрахункової методики проектування.

**Основні завдання дослідження.**

1) Провести аналіз сучасного стану із нормування та проектування легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами.

2) Розробити методику і провести математичне моделювання поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

3) Розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

4) Розробити методику та визначити ефективні характеристики деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів та умов їх виходу із замків стандартного виконаного профілю легкоскидних конструкцій, що улаштовані на їх основі.

5) З урахуванням виявлених ефективних характеристик деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів та умов їх виходу із замків стандартного виконаного профілю виявити закономірності залежностей

параметрів спрацьовування відповідних легкоскидних конструкцій від конструктивних параметрів.

б) Розробити розрахунковий метод проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху шляхом побудування відповідних номограм та таблиць.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у розкритті закономірностей залежностей параметрів деформування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху від їх конструктивних параметрів. При цьому уперше:

- виявлені закономірності залежностей ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках стандартного віконного профілю від надлишкового тиску вибуху;

- розроблена математична модель деформування стільникових полікарбонатних листів у стандартному віконному профілі під впливом тиску вибуху, заснований на теорії напружено-деформованого стану пружних пластинок та оболонки;

- розроблена математична модель для визначення ширини і висоти секцій легкоскидних конструкцій із стільниковими полікарбонатними листами, на основі якого побудовані номограми та довідникова таблиця для визначення проектних розмірів секцій даних легкоскидних конструкцій

*Набуло подальшого розвитку* застосування розрахункових інженерних методик проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами для визначення відповідних вихідних даних для проектування будівель та споруд з їх застосуванням.

*Удосконалено* теоретичну та експериментальну базу щодо забезпечення вибухопожежобезпеки у приміщеннях промислових будівель шляхом улаштування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими прозорими елементами.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у розробці інженерного розрахункового методу проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами в умовах впливу надлишкового тиску вибуху, що дозволяє встановити мінімальні проектні розміри для забезпечення їх надійного спрацювання. Це дозволяє уникнути матеріальних та трудових затрат при улаштуванні безінерційних ЛСК із гнучкими огорожувальними елементами із використанням розробленого методу як альтернативи безінерційних ЛСК із огорожувальним склінням, оскільки за умов використання першого типу ЛСК допускається повторне використання огорожувальних елементів, а також їх підбір під існуючі системи прозорого огороження будівель. Отримані номограми та таблиці мінімальних розмірів прорізів для різних конструктивних параметрів полікарбонатних плит, що гарантують їх надійне спрацювання за умов критичних значень надлишкового тиску вибуху.

Розроблені методики впроваджені у практичну діяльність аудиторської організації ТОВ «Центр пожежно-технічного аудиту», технологічний процес випробувань Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, а також у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України при викладанні дисципліни «Пожежна безпека територій, будівель та споруд». Результати дисертаційної роботи використано при розробці проекту державного стандарту України ДСТУ Х Х ХХ:20ХХ Пожежна безпека. Метод визначення параметрів легкоскидних конструкцій для вибухопожежонебезпечних приміщень та будинків

**Методи дослідження.** Процеси деформування гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умови їх спрацювання вивчені за допомогою розрахункового й експериментального методів, із

застосуванням дослідних установок. Для визначення основних закономірностей залежності параметрів деформування та спрацьовування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами від конструктивних параметрів під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху, залучено метод математичного моделювання, заснований на теорії С. Тимошенка для оболонок і пластинок. Для верифікації достовірності й адекватності результатів експериментів і моделювання поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами використано методи математичного моделювання, ґрунтовані на методі кінцевих елементів.

У **першому розділі** проаналізовано статистику пожеж і випадків, що супроводжувані вибухом. Доведено, що забезпечення вибухозахисту за допомогою легкоскидних конструкцій із гнучкими прозорими огорожувальними елементами слугує ефективним засобом. Вивчено сучасне нормативне забезпечення, чинне в Україні й за кордоном, на цій підставі аргументована необхідність його удосконалення, з огляду на перспективи застосування легкоскидних конструкцій із гнучкими прозорими огорожувальними елементами. Крім того, у першому розділі описано методи теоретичного й експериментального дослідження елементів легкоскидних конструкцій в умовах вибуху. На основі результатів проведеного аналізу сформульовано мету та основні завдання роботи.

У **другому розділі** окреслено підходи до математичного опису деформування стільникових полікарбонатних листів як гнучких прозорих огорожувальних елементів легкоскидних конструкцій. Результати проведеного аналізу засвідчують, що найбільш ефективним методом для такого опису є застосування теорії пластинок та оболонок С. Тимошенка. На підставі використання цієї теорії запропоновано математичну модель деформування стільникових полікарбонатних листів на основі рівняння статичної рівноваги. Запропонована математична модель дає змогу проводити проектні розрахунки даних легкоскидних конструкцій за умови доповнення необхідними ефективними механічними характеристиками стільникових полікарбонатних листів, що мають

бути з'ясовані експериментальним способом. Крім цього, для проведення уточнених розрахунків запропоновано диференціальні рівняння, що складені на основі законів збереження й напружено-деформованого стану, у чисельній апроксимації за допомогою методу кінцевих елементів та явного методу інтегрування для їх розв'язання.

**Третій розділ** присвячено опису експериментального обладнання, зразків для випробувань і методикам експериментального дослідження пружних характеристик стільникових полікарбонатних листів та сил тертя, що виникають у разі витягування стільникових полікарбонатних листів із замків стандартного віконного профілю. Основне експериментальне обладнання – установка для вивчення найбільшого прогину стільникових полікарбонатних листів під впливом механічного навантаження, що імітує вплив вибуху, а також установка, яка вимірює силу витягування стільникових полікарбонатних листів із замків стандартного віконного профілю. Експеримент полягав у покроковому прикладанні розподіленого навантаження до стільникових полікарбонатних листів із вимірюванням максимального прогину на кожному кроці впритул до виходу країв стільникових полікарбонатних листів із замків віконного профілю. У ході вивчення сил тертя виміряно максимальну силу, за якої простежуваний вихід країв стільникових полікарбонатних листів із замків віконного профілю.

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень у вигляді кривих, які описують залежність максимального прогину стільникових полікарбонатних листів від величини прикладеного тиску. На основі отриманих кривих визначено основні ефективні параметри, що описують механічні властивості стільникових полікарбонатних листів, якими є ефективна жорсткість і критичне переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках віконного профілю. Представлено результати визначення сил тертя країв стільникових полікарбонатних листів у замках віконного профілю у вигляді залежності сили витягування від товщини стільникового полікарбонатного листа.

**П'ятий розділ** присвячено застосуванню запропонованого математичного апарату для опису деформування стільникових полікарбонатних листів у замках

віконного профілю під впливом вибуху, під час з'ясування математичної залежності між проектними розмірами прорізів секцій легкоскидних конструкцій, які забезпечують їх надійне спрацьовування. На підставі отриманих залежності та співвідношення побудовано номограми й довідникові таблиці, що дають змогу проводити ефективний інженерний розрахунок проектних даних секцій легкоскидних конструкцій із гнучким прозорим огороженням на основі стільникових полікарбонатних листів. Отримані результати перевірені за допомогою порівняння з результатами математичного моделювання, із використанням методу кінцевих елементів. Доведено достатню адекватність результатів, що отримані за розробленою методикою. Ефективність розробленої методики проілюстрована під час її застосування на конкретному прикладі.

**Ключові слова:** легкоскидні конструкції, гнучке прозоре огороження, стільникові полікарбонатні листи, теорія пластин та оболонок, метод кінцевих елементів, інженерний розрахунковий метод.

### Список публікацій здобувача

1. Pozdieiev S., Pidhoretskiy Yu., Nekora O., Sidnei S., Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. 7 (4.3). P. 298–302 URL: [www.sciencepubco.com/index.php/IJET](http://www.sciencepubco.com/index.php/IJET).

2. Ніжник В., Добряк Д., Підгорецький Ю. Дослідження розкриття прорізів легкоскидних конструкцій зі стільникових полікарбонатних листів під дією вибуху. *Наукове видання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Т. 4. № 1. С. 55–61.

3. Підгорецький Ю. Ю. Дослідження надійності спрацьовування легкоскидних конструкцій із стільниковими полікарбонатними листами методом кінцевих елементів. *Міжвідомчий збірник наукових праць. Геотехнічна механіка*. Дніпро, 2020. Вип. 152. С. 107–115.



4. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Pidhoretskiy Yu. Research of Disclosure of Relief Venting Structures with Polycarbonate Fencing in Conditions of Explosion. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1021. 012025. URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1021/1>.

5. Pidhoretskiy Yu. Research of the Actuation Reliability of Blast Relieve Systems with Honeycomb Polycarbonate Sheets. *The Scientific Heritage*. Hungary, Budapesht, 2020. Vol. 1. № 57. P. 45–50.

*Особистий внесок здобувача в працях, опублікованих у співавторстві*

[1] – аналіз наукових робіт, присвячених формулюванню основних положень та створенню розрахункових схем математичної моделі, виведенню формули щодо опису критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках віконного профілю;

[2] – дослідження отриманих математичних моделей із побудовою номограм і таблиць щодо проектних розмірів секцій легкоскидних конструкцій зі стільниковими полікарбонатними листами;

[4] – розроблення номограм та таблиць щодо проектних розмірів секцій легкоскидних конструкцій зі стільниковими полікарбонатними листами.

**Апробація матеріалів дисертації**

1. Поздєєв С. В., Підгорецький Ю. Ю., Некора О. В. Дослідження поведінки легкоскидних конструкцій на основі гнучких прозорих матеріалів в умовах вибуху. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту»*: тези доповідей (Харків, 14 – 16 травня 2018 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 267.

2. Поздєєв С. В., Ніжник В. В., Підгорецький Ю. Ю., Швиденко А. В. Чисельне дослідження несучої здатності дерев'яного перекриття в умовах пожежі. *Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті»*: тези доповідей (Харків, 18–20 листопада 2020 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 103.

3. Підгорецький Ю. Ю. Проблематика нормативно-правового регулювання розрахунку проектних параметрів легкоскридних конструкцій в Україні. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 196.

*Особистий внесок у працях, опублікованих зі співавторами*

[1] – аналіз наукових робіт із формулювання основних положень та створення розрахункових схем математичної моделі, виведення формули щодо опису критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках віконного профілю;

[2] – дослідження отриманих математичних моделей із побудовою номограм і таблиць щодо проектних розмірів секцій легкоскридних конструкцій зі стільниковими полікарбонатними листами.

## SUMMARY

*Pidhoretskyi Y. Y.* Calculation method of predicting the behavior of flexible transparent elements of relief venting constructions in condition of explosion. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining PhD degree in specialty 261 «Fire safety». – Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine (NUTSZU), Cherkasy, 2021.

**Relevance.** The industrial basis of Ukraine includes a large number of enterprises with increased danger of explosion and fire hazard that require the use of special engineering measures to protect people and property from dangerous factors of explosion. One of the most effective engineering solutions is the installation of venting constructions that allow to quickly reducing the excess explosion pressure to safe indicators.

Besides the task of determining, the required area of the venting constructions, there should be the task of their improvement by using the flexible fencing components based on polymeric materials that allow their multiply use in contrast to the glass

fencing. The use of venting constructions with such a design is limited because of the lack of scientifically grounded calculation methods for their design.

Therefore, identifying the patterns of dependence of the parameters of operation of relief venting constructions with flexible fencing components from their design parameters is an acute task, and the results of its solving could become a basis for creating engineering methods for designing relief venting constructions with flexible elements.

**The idea of the work** is to provide adequate protection against explosion with the help of relief venting constructions with flexible elements by developing a calculation method for their designing.

**The object of the research** – the processes of deformation of flexible fencing elements of relief venting constructions and the conditions for their performance in the condition of excess of explosion pressure.

**The subject of the research** the patterns of the processes of deformation of the flexible fencing elements of relief venting constructions and the conditions of their performance depending on their design parameters: thickness, aperture sizes, physical and mechanical properties of the materials and standardized parameters of the probable explosion.

**The research aim** is to reveal the patterns of behavior of flexible fencing elements of relief venting constructions and the conditions of their performance under the influence of dynamic loads under the conditions of the explosion depending on their design parameters as the basis for developing appropriate calculation methodology for designing.

#### **The main tasks of the research.**

1. To analyze the current state of norms and designing the venting constructions with flexible elements.
2. To develop a technique and to conduct mathematical modeling of the behavior of relief venting constructions with flexible fencing elements under the influence of dynamic loads in explosion conditions.

3. To develop a technique and to conduct experimental studies of the behavior of relief venting constructions with flexible fencing elements under the influence of dynamic loads in explosion conditions.

4. To develop a technique and to determine the effective characteristics of deformation of cellular polycarbonate sheets of flexible elements and the conditions of their release from the locks of the standardized profile of venting constructions that are arranged on their basis.

5. Considering the revealed effective characteristics of deformation of cellular polycarbonate sheets of flexible elements and conditions of their release from the locks of the standard produced profile to reveal regularities of dependences of the parameters of performance of the corresponding venting constructions depending on the parameters of the construction.

6. To develop a calculation method for design of the relief venting constructions with flexible fencing elements under the influence of dynamic loads under explosion conditions by constructing appropriate nomograms and tables.

**The scientific novelty of the thesis** is to reveal the regularities of the dependences of the parameters of deformation of the relief venting constructions with flexible fencing elements under the influence of dynamic loads and in the conditions of explosion from their design parameters. For the first time:

- the revealed regularities of dependences of effective stiffness and critical movement of edges of cellular polycarbonate sheets in the locks of a standardized window profile from the explosion pressure;

- developed the mathematical apparatus of deformation of cellular polycarbonate sheets in a standardized window profile under the influence of the explosion pressure, based on the theory of stress-strain state of elastic plates and shells;

- developed the mathematical apparatus for determining the width and height of sections of venting constructions with cellular polycarbonate sheets on the basis of which the nomograms and the reference table for determining the design dimensions of sections of venting constructions are made.

The application of the calculation engineering methods for the design of relief venting constructions with flexible elements to determine the appropriate initial data for the design of the buildings and the structures with their usage *has been further developed.*

The theoretical and experimental base for ensuring explosion and fire safety in the premises of the industrial buildings by installing of the relief venting constructions with flexible transparent elements *has been improved.*

**The practical significance of the acquired results.** The practical value of the thesis research is to develop an engineering calculation method for the design of the relief venting constructions with flexible fencing elements under the conditions of the influence of the excess explosion pressure that allows to set the minimum design dimensions to ensure their reliable operation. It allows to avoid material and labor costs when installing the relief venting constructions with flexible fencing elements using the developed method as an alternative to the non- inertial venting constructions with fencing glazing, because under the conditions of using the first type of the venting constructions it is allowed to reuse the fencing elements, as well as their choice according to the existing system of the transparent fencing of the building. The acquired nomograms and tables of the minimum sizes of apertures for various design parameters of polycarbonate sheets that guarantee their reliable operation under the conditions of critical values of the excess pressure of explosion.

The developed methods have been introduced into the technological process of tests at the test site of the Institute of Public Administration and Scientific Researches of Civil Defense, into the practice of "Fire-technical audit center" LLC, as well as into the educational process of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defense of Ukraine into the subject "Safety of potentially dangerous technologies and industries." The results of the thesis were used in the development of the draft for the state standard of Ukraine DSTU X X XX: 20XX Fire safety. Method of determining the parameters of the venting constructions for the explosion-hazardous premises and buildings.

**Research methods.** The research of the processes of deformation of flexible fencing elements of the relief venting constructions and the conditions of their operation were carried out by calculation and experimental method with the use of the research facilities. The method of the mathematical modelling, that is based on Timoshenko Theory of Plates and Shells, was used to define the basic regularities of the dependences of the parameters of deformation and operation of the relief venting constructions with flexible fencing elements from their design parameters under the influence of dynamic loads under the explosion condition. The study of the credibility and adequacy of the results of the experiments and modeling the behavior of the relief venting constructions with the flexible fencing elements the methods of the mathematical modeling based on the application of the finite element method in the implementation of the explicit method has been used.

**The first chapter** carries the analysis of the statistics of the fires and cases when they are accompanied by an explosion. It is shown that providing appropriate explosion protection with the help of the venting constructions with the transparent flexible fencing elements is an effective method. The modern normative provision, which is valid in Ukraine and abroad, has been analyzed, and as a result it was shown that the necessity for its improvement given the perspective of application of the venting constructions with the transparent flexible fencing elements. The first chapter also analyzed the methods of theoretical and experimental research of elements of the venting constructions in the conditions of explosion. Considering the results of the analysis, the purpose and the main aims of the research have been formulated.

**The second chapter** analyzed the approaches of the mathematical description of deformation of cellular polycarbonate sheets as flexible transparent fencing elements of the venting constructions. As a result of the analysis it is shown that the most effective method for such a description is the application of Timoshenko Theory of Plates and Shells. A mathematical model of deformation of cellular polycarbonate sheets based on the equation of static equilibrium was proposed using the given theory. It was also shown that the proposed mathematical model allows to perform design calculations of the given venting constructions provided the addition of the necessary effective

mechanical characteristics of cellular polycarbonate sheets which must be determined experimentally. In addition, for conducting the specified calculations it has been proposed to use differential equations that are based on the laws of saving and stress-strain state in numerical approximation using the finite element method and the explicit method of integration to solve them.

**The third chapter** is dedicated to the description of the experimental equipment, specimens for the tests and methods of experimental study of elastic characteristics of cellular polycarbonate sheets and friction forces that occur when extension cellular polycarbonate sheets from the locks of standardized window profile. The main experimental equipment is the facility for studying the maximum deflection of cellular polycarbonate sheets under the influence of the mechanical load that simulates the effect of an explosion, as well as the facility measuring the pulling force of cellular polycarbonate sheets from locks of standardized window profile. The experiment was a step by step application of the distributed load to the cellular polycarbonate sheets to measure the maximum deflection at every step close to the edges of the cellular polycarbonate sheets from the locks of the window profile. While studying the friction force we were measuring the maximum force when the release of the edges of the cellular polycarbonate sheets from the locks of the window profile was noticed.

**The fourth chapter** presents the results of the experimental studies as the curves that describe the dependence of the maximum deflection of the cellular polycarbonate sheets on the value of the applied pressure. Based on the obtained curves, the main effective parameters were determined that are describing the mechanical properties of cellular polycarbonate sheets, which are the effective stiffness and critical movement of the edges of the cellular polycarbonate sheets in the locks of the window profile. There were also presented the results of determining the friction forces of the edges of the cellular polycarbonate sheets in the locks of the window profile in the form of the dependence of the pulling force on the thickness of the cellular polycarbonate panel.

**The fifth chapter** is dedicated to the application of the proposed mathematical apparatus to describe the deformation of the cellular polycarbonate sheets in the locks of the window profile under the influence of explosion when establishing mathematical

relationships between the design dimensions of the apertures of the sections of the venting constructions that ensure their reliable operation. The corresponding nomograms and reference tables were made using the obtained dependences and correlations that allow to carry out effective engineering calculation of the design data of sections of the venting constructions with flexible transparent fencing on the basis of cellular polycarbonate sheets. The obtained results were verified by comparing them with the results of a mathematical modeling using the finite element method. As a result, the adequacy of the results, obtained by the developed method, was shown. The effectiveness of the developed technique was illustrated by its application on the specific example.

**Key words:** venting constructions, flexible transparent fencing, cellular polycarbonate sheets, Theory of Plates and Shells, finite element method, engineering calculation method.

#### **List of applicant`s publications**

1. Pozdieiev S., Pidhoretskiy Y., Nekora O., Sidnei S., Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. 7 (4.3). P. 298–302. URL: [www.sciencepubco.com/index.php/IJET](http://www.sciencepubco.com/index.php/IJET).

2. Nizhnyk V., Dobriak D., Pidhoretskyi Y. Research of the opening of slots of the relief venting constructions made of cellular polycarbonate sheets under the explosion. *Scientific publication. Emergency situations: prevention and liquidation: the collection of scientific papers*. Cherkasy: ChIPB named after Chernobyl Heroes NUCP Ukraine, 2020. Book 4. № 1. P. 55–61.

3. Pidhoretskyi Y. Y. Research of the reliability of operation of the relief venting constructions of cellular polycarbonate panels by the finite element method. *Interdepartment collection of scientific works. Geotechnical Mechanics*. Dnipro, 2020. Issue 152. P. 107–115.

4. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Pidhoretskiy Yu. Research of Disclosure of Relief Venting Structures with Polycarbonate Fencing in Conditions of Explosion. *IOP Conf*.



*Series: Materials Science and Engineering.* 2021. 1021. 012025. URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1021/1>.

5. Pidhoretskyi Y. Research of the Actuation Reliability of Blast Relieve Systems with Honeycomb Polycarbonate Sheets. *The Scientific Heritage*. Hungary, Budapest, 2020. Vol. 1. № 57. P. 45–50.

*Applicant's personal contribution to the works published in co-authorship*

[1] – analysis of the scientific works of the given field of formulation of the main provisions and creation of calculation schemes of the mathematical model, derivation of a formula to describe the critical movement of the edges of the cellular polycarbonate sheets in the locks of the window profile;

[2] – analysis of the obtained mathematical models with the creation of the appropriate nomograms and tables on the design dimensions of the sections of the relief venting constructions of cellular polycarbonate sheets;

[4] – development of the corresponding nomograms and tables on the design dimensions of the sections of the relief venting constructions of cellular polycarbonate sheets.

**The approbation of the materials of the thesis**

1. Pozdeev S. V., Pidhoretskyi Y. Y., Nekora O. V. Research of the behavior of the relief venting structures based on the flexible transparent materials in conditions of explosion. *V International Scientific and Technical Conference «Transport Technologies and Infrastructure»*: abstracts (Kharkiv, 14–16 May 2018 y.). Kharkiv: UkrDUZT, 2018. P. 267.

2. Pozdeev S. V., Nizhnyk V. V., Pidhoretskyi Y. Y., Shvydenko A.V. Numerical study of the load-bearing capacity of wooden floor joists in case of fire. *International Scientific and Technical Conference «Energy Efficiency in Transport»*: abstracts (Kharkiv, 18–20 November 2020 y.). Kharkiv: UkrDUZT, 2020. P. 103.

3. Pidhoretskyi Y. Y. Problems of normative legal regulation of calculation of the design parameters of relief venting structures in Ukraine. *Theory and practice of firefighting and emergency response: Materials of the XI International Scientific and Practical Conference-Cherkasy: CIFS named after Chornobyl Heroes NUCP Ukraine*, 2020. P. 196.

*Personal contribution in the works published with co-authors*

[1] – analysis of the scientific works of the given area of formulation of the main provisions and creation of calculation schemes of the mathematical model, derivation of a formula to describe the critical movement of the edges of the cellular polycarbonate sheets in the locks of the window profile;

[2] – analysis of the obtained mathematical models with the creation of the appropriate nomograms and tables on the design dimensions of the sections of the relief venting constructions of cellular polycarbonate sheets.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗІНЕРЦІЙНИХ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	29
1.1. Нормативні вимоги щодо улаштування безінерційних легкоскідних конструкцій.....	29
1.2. Обставини та наслідки вибухів.....	32
1.3. Конструктивні особливості безінерційних легкоскідних конструкцій.....	44
1.4. Конструкція безінерційних легкоскідних конструкцій із гнучкими огороджувальними елементами.....	49
1.5. Мета й завдання досліджень.....	51
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СТІЛЬНИКОВИХ ЛИСТІВ ПІД ВПЛИВОМ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ.....	53
2.1. Навантаження на елементи конструкцій за умов впливу вибуху.....	53
2.2. Технічний опис легкоскідних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів.....	61
2.3. Математична модель поведінки стільникових полікарбонатних листів в умовах навантаження в разі вибуху досліджуваних систем легкоскідних конструкцій...64	64
2.3.1. Розрахункові схеми.....	65
2.3.2. Математична модель для визначення конструктивних параметрів рам для систем легкоскідних конструкцій.....	66
2.4. Математична модель для розрахунків динамічного впливу в легкоскідних конструкціях за умов динамічного впливу вибуху.....	71
2.4.1. Базова математична модель явного методу розрахунків динамічного впливу в системах.....	71
2.4.2. Кінцево-елементна апроксимація базових рівнянь динамічної взаємодії.....	74
2.4.3. Математична модель для опису контактної взаємодії.....	75

2.4.4. Явний метод чисельної апроксимації рівнянь динаміки.....	79
2.5. Висновки до розділу.....	80
РОЗДІЛ 3. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СТІЛЬНИКОВИХ ЛИСТІВ ПІД ВПЛИВОМ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ.....	82
3.1. Методика визначення ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів.....	82
3.1.1. Обладнання для дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів.....	82
3.1.2. Зразки для дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів.....	84
3.1.3. Методика дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів.....	86
3.2. Методика визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення.....	88
3.2.1. Обладнання для дослідження розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення.....	88
3.2.2. Методика дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів.....	91
3.3. Висновки до розділу.....	92
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СТІЛЬНИКОВИХ ЛИСТІВ ПІД ВПЛИВОМ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ.....	93
4.1. Результати експериментальних досліджень щодо визначення ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів.....	93
4.2. Результати експериментальних досліджень щодо визначення ефективних сил тертя стільникових полікарбонатних листів.....	97
4.3. Розрахункова методика визначення ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів.....	98

4.4. Результати визначення ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів.....	101
4.5. Висновки до розділу.....	103
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ СТІЛЬНИКОВИХ ПОЛІКАРБОНАТНИХ ЛИСТІВ.....	104
5.1. Визначення критичного прогину стільникових полікарбонатних листів.....	104
5.2. Методика визначення мінімальної ширини секції легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів.....	105
5.3. Перевірка адекватності результатів, отриманих із використанням розробленої розрахункової методики.....	110
5.3.1. Загальне формулювання завдання зі спрацьовування легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів.....	110
5.3.2. Геометрія розрахункової області.....	111
5.3.3. Властивості матеріалів.....	112
5.3.4. Граничні умови.....	114
5.3.5. Кінцево-елементна схема.....	115
5.3.6. Результати розрахунку.....	116
5.4. Загальна методика проектування систем легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів.....	119
5.5. Приклад застосування методики проектування систем легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів.....	121
5.6. Висновки до розділу.....	124
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТОК А.....	140
ДОДАТОК Б.....	143
ДОДАТОК В.....	147

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЛСК – легкоскідні конструкції.

ГПЕ – гнучкий прозорий елемент.

СПЛ – стільниковий полікарбонатний лист.

ГУ – граничні умови.

МКЕ – метод кінцевих елементів.

ЯМ – явний метод.

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь.

МХ – механічні характеристики.

## ВСТУП

Індустріально-промислова база України охоплює численну кількість підприємств із підвищеною вибухопожежною небезпекою, що потребують застосування спеціальних інженерних заходів для захисту людей і матеріальних цінностей від небезпечних факторів вибуху. Одне з найбільш ефективних інженерних рішень – влаштування легкоскидних конструкцій, які дають змогу швидко знижувати надлишковий тиск вибуху до безпечних величин. Крім визначення необхідної площі огороження легкоскидних конструкцій, потрібно їх удосконалити через застосування гнучких огорожувальних елементів на основі полімерних матеріалів, що вможливають їх багаторазове застосування, на відміну від скляного огороження.

У ході використання гнучких огорожувальних елементів для влаштування легкоскидних конструкцій мають бути застосовані надійні інженерні розрахунково-проектувальні методики, які б давали змогу конструювати такі системи з гарантуванням їхньої ефективної роботи за умов вибуху. Для розроблення таких методик ефективним є теоретичний підхід, заснований на теоретичних засадах опису напружено-деформованого стану в огорожувальних елементах, зокрема з огляду на їхню нелінійну поведінку. Цей підхід уможливає виявлення закономірностей залежності параметрів спрацьовування конструкцій від їхніх конструктивних характеристик, що сприяє складанню таблиць і номограм для їх ефективного проектування. Теоретичний підхід вимагає бази початкових даних щодо властивостей матеріалів гнучких елементів, граничних умов закріплення та навантаження під час роботи в умовах вибуху.

Виявлення закономірностей залежності параметрів спрацьовування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами від їхніх конструктивних параметрів – актуальне завдання, результати виконання якого могли б послугувати підґрунтям для створення інженерних методик проектування безінерційних ЛСК із гнучкими елементами.

**Актуальність теми дослідження.** У працях вітчизняних (П. Іващенко, Н. Імайкін, А. Лейбман, Г. Орлов, Л. Пілюгін, С. Поздєєв, Н. Попов, Б. Расторгуєв, В. Румянцев, Н. Стрельчук, М. Стрижевський) та зарубіжних (В. Bradkey, М. Charney, Н. Pasman, W. Simmonds, С. Yao, R. Zalosh) учених схарактеризовано методи визначення конструктивних параметрів огорожувальних елементів інерційних легкоскидних конструкцій розрахунковим способом.

Нині в улаштуванні вибухозахисних систем безінерційних легкоскидних конструкцій (ЛСК) поширення набули огорожувальні елементи з гнучких полімерних матеріалів, як-от полікарбонатні стільникові панелі. Основною перевагою такої конструкції безінерційних ЛСК є можливість повторного використання огорожувальних елементів. Унаслідок застосування цього підходу, зменшуються економічні й трудові витрати на монтаж і відновлення ЛСК, що спрацювали, а також стає можливим гнучке підлаштування під наявне скління зі стандартними віконними профілями, завдяки добору товщини листа та кроку стільникової структури.

Продуктивне застосування безінерційних ЛСК із гнучкими елементами гальмує відсутність науково обґрунтованих розрахункових методик проектування ЛСК. Гнучкі елементи мають складну комірчасту структуру, складаються з полімерних матеріалів, що мають механічні властивості, описані складними залежностями напружень та деформацій у теорії напружено-деформованого стану в нелінійній постановці. Крім цього, має бути взята до уваги динамічність впливів на елементи ЛСК за умов вибуху. Це ускладнює створення розрахункових методик конструювання ЛСК із гнучкими елементами, оскільки база таких даних поки є неповною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проведено відповідно до:

1) розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року»;



2) розділу 2 п. 17 «Плану наукової та науково-технічної діяльності ДСНС України на 2019 рік»;

3) розділу 2 п. 4 «Плану наукової та науково-технічної діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля (ЧПБ) НУЦЗ (Національного університету цивільного захисту) України на 2019 рік»;

4) науково-дослідницької роботи в ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Обґрунтування методики розрахунку параметрів легкоскидних конструкцій для вибухопожежонебезпечних приміщень» («ЛСК МЕТОДИКА»), державний реєстраційний номер НДР 0119U102352, де здобувач був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у забезпеченні належного захисту проти вибуху за допомогою безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами шляхом розроблення розрахункової методики їх проектування.

**Мета роботи** полягає у розкритті закономірностей поведінки гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умов їх спрацювання під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху залежно від їх конструктивних параметрів як підґрунтя щодо розроблення відповідної розрахункової методики проектування.

#### **Основні задачі дослідження.**

1. Провести аналіз сучасного стану із нормування та проектування легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами.

2. Розробити методику і провести математичне моделювання поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

3. Розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

4. Розробити методику та визначити ефективні характеристики деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів та умов їх виходу із замків стандартного виконаного профілю легкоскидних конструкцій, що улаштовані на їх основі.

5. З урахуванням виявлених ефективних характеристик деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів та умов їх виходу із замків стандартного виконаного профілю виявити закономірності залежностей параметрів спрацювання відповідних легкоскидних конструкцій від конструктивних параметрів.

6. Розробити розрахунковий метод проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху шляхом побудування відповідних номограм та таблиць.

**Об'єкт дослідження** – процеси деформування гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умови їх спрацювання під впливом надлишкового тиску вибуху.

**Предмет дослідження** – закономірності процесів деформування гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умови їх спрацювання в залежності від їх конструктивних параметрів: товщини, розмірів прорізів, фізико-механічних властивостей матеріалів та нормованих параметрів імовірного вибуху.

**Методи дослідження.** Дослідження процесів деформування гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умови їх спрацювання проводилися розрахунковим та експериментальним методом із застосуванням дослідних установок. Для встановлення основних закономірностей залежностей параметрів деформування та спрацювання безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами від їх конструктивних параметрів під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху був використаний метод математичного моделювання, заснований на теорії Тимошенко для оболонок та пластинок. Вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами використані методи математичного моделювання засновані на застосуванні методу кінцевих елементів у реалізації за явним методом.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у розкритті закономірностей залежностей параметрів деформування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху від їх конструктивних параметрів. При цьому уперше:

- виявлені закономірності залежностей ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках стандартного віконного профілю від надлишкового тиску вибуху;

- розроблена математична модель деформування стільникових полікарбонатних листів у стандартному віконному профілі під впливом тиску вибуху, заснований на теорії напружено-деформованого стану пружних пластинок та оболонок;

- розроблена математична модель для визначення ширини і висоти секцій легкоскидних конструкцій із стільниковими полікарбонатними листами, на основі якого побудовані номограми та довідникова таблиця для визначення проектних розмірів секцій даних легкоскидних конструкцій

*Набуло подальшого розвитку* застосування розрахункових інженерних методик проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами для визначення відповідних вихідних даних для проектування будівель та споруд з їх застосуванням.

*Удосконалено* теоретичну та експериментальну базу щодо забезпечення вибухопожежобезпеки у приміщеннях промислових будівель шляхом улаштування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими прозорими елементами.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується логічним викладенням та відповідністю поставлених для досягнення визначеної мети досліджень і завдань і методів їх розв'язання, заснованих на загальноновизнаних методах наукових досліджень; застосуванням методів механіки деформованого твердого тіла, регресійного аналізу, поліноміальної та експоненціальної апроксимації і найменших квадратів, а також теорії математичної статистики. Максимальне значення відносної похибки

між отриманими експериментальними та розрахованими даними при визначенні температурних розподілів і меж вогнестійкості не перевищує 14 %, критерій Фішера не перевищує табличних значень при рівні значущості 0.05. Усі припущення, прийняті у роботі, а також результати досліджень не суперечать законам механіки та відповідають сучасним фізичним уявленням про досліджувані процеси.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у розробці інженерного розрахункового методу проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами в умовах впливу надлишкового тиску вибуху, що дозволяє встановити мінімальні проектні розміри для забезпечення їх надійного спрацювання. Це дозволяє уникнути матеріальних та трудових затрат при улаштуванні безінерційних ЛСК із гнучкими огорожувальними елементами із використанням розробленого методу як альтернативи безінерційних ЛСК із огорожувальним склінням, оскільки за умов використання першого типу ЛСК допускається повторне використання огорожувальних елементів, а також їх підбір під існуючі системи прозорого огородження будівель. Отримані номограми та таблиці мінімальних розмірів прорізів для різних конструктивних параметрів полікарбонатних плит, що гарантують їх надійне спрацювання за умов критичних значень надлишкового тиску вибуху.

Розроблені методики впроваджені у практичну діяльність аудиторської організації ТОВ «Центр пожежно-технічного аудиту», технологічний процес випробувань Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, а також у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України при викладанні дисципліни «Пожежна безпека територій, будівель та споруд». Результати дисертаційної роботи використано при розробці проекту державного стандарту України ДСТУ Х Х ХХ:20ХХ Пожежна безпека. Метод визначення параметрів легкоскидних конструкцій для вибухопожежонебезпечних приміщень та будинків

*Апробація результатів дисертації* відбулася під час IV Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій (м. Черкаси, 2013 р.); Усеукраїнської науково-практичної конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (м. Харків, 2013 р.); 16 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників (м. Київ, 2014 р.); VI Міжнародної науково-практичної конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2014 р.).

*Публікації.* Основний зміст роботи викладено в 6 наукових статтях, із них 5 опубліковано у виданнях, що входять до переліку ДАК України, 1 статтю – у закордонному науковому журналі, а також у тезах 5 доповідей на науково-практичних конференціях і семінарах.

*Структура й обсяг роботи.* Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів і загальних висновків, списку використаних джерел (132 найменування). Дослідження містить 150 сторінок друкованого тексту, 35 таблиць, 77 рисунків та 3 додатки.

# РОЗДІЛ 1

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ

### БЕЗІНЕРЦІЙНИХ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

#### 1.1. Нормативні вимоги щодо улаштування безінерційних легкоскридних конструкцій

Згідно зі статистичними даними [1 – 6] щодо пожеж в Україні та в усьому світі, на кожен тисячу пожеж і загорань пожежа супроводжується вибухом у двох випадках. З-поміж ста пожеж у промисловому секторі одна пожежа призводить до вибуху. Якщо внаслідок пожежі трапляються вибухи, рівень соціально-економічних втрат набуває найбільших величин. Такий стан має тенденцію до збільшення через ущільнення вибухонебезпечних виробництв. Для України це найбільш актуально в галузі енергетичних, паливопереробних, паливозберезувальних, хімічних підприємств, а також підприємств агропромислового, харчового й деревообробного комплексів.

Для виробничих будівель, де можливі вибухи горючих сумішей, поряд із превентивними заходами вживають заходів щодо захисту людей, устаткування й будівельних конструкцій у разі виникнення вибуху всередині приміщення. Такий стан умотивований тим, що утворення вибухонебезпечних концентрацій відбувається так швидко, що обслуговувальний персонал, зазвичай, не в змозі запобігти вибуху.

Більша швидкість поширення полум'я й висока температура, що виникає в разі вибуху горючих сумішей у приміщенні, різко підвищують тиск усередині будинку, призводять до руйнування елементів устаткування та будівельних конструкцій і зупинки виробництва. Часто внаслідок вибухів велика кількість людей втрачає працездатність, іноді гине.

Багаторічний аналіз аварій [1–9], що відбуваються на підприємствах хімічної й нафтохімічної промисловості в нашій країні та за кордоном, доводить, що більша частина аварій пов'язана з утворенням і вибухом парогазових сумішей, 1/2 частина

з них трапляється у виробничих приміщеннях і відкритих установках. Незважаючи на оснащення виробничих об'єктів найсучаснішими засобами вибухозахисту, запобігання вибухам не завжди можливе.

Основних збитків виробництво, зокрема обслуговувальний персонал, зазнає через обвалення будівельних конструкцій. Із проаналізованих 136 аварій [3], що сталися в різний час на підприємствах хімічної й нафтохімічної промисловості, 86 аварій (вибухи в закритих системах) зумовлені несправністю блокувань і приладів, 24 аварії (вибухи в зовнішніх установках) – відсутністю сигналізаторів вибухонебезпечних газів і засобів локалізації викидів газів в атмосферу. 110-ти вибухам можна було запобігти, тому знання причин, які породжують аварійні вибухи, допоможе заздалегідь передбачити необхідні заходи, спрямовані на уникнення вибухів або їх локалізацію у виробничих приміщеннях.

Відсутність чи ненадійність засобів протиаварійного захисту від загазованості призводять до вибухів газів у робочих приміщеннях і на відкритих установках. На підставі аналізу актів розслідування аварій, результатів обстежень виробництв, матеріалів, опублікованих у працях [3–9], з'ясовано:

- причини аварій експлуатованого устаткування;
- основні елементи устаткування, що стали джерелами утворення вибухонебезпечних сумішей у приміщенні;
- розподілені вибухи, залежно від джерел запалення газоповітряної суміші;
- особливості вибухів через руйнівний вплив на будівельні конструкції й устаткування.

Причини вибухів у виробничих приміщеннях систематизовано в табл. 1.1. Під час експлуатації вибухонебезпечних виробництв джерелом утворення вибухонебезпечного середовища в приміщенні стає, зазвичай, технологічне устаткування. Знання елементів устаткування, які найбільш часто є джерелами створення горючого середовища, необхідне для розроблення профілактичних заходів із запобігання вибухам і для вибору методів захисту [1–3].

**Причини виникнення вибухів у промислових будівлях**

<b>Причини вибухів</b>	<b>Середнє щорічне значення за останні 10 років</b>
Неякісно виконаний монтаж технологічного обладнання	6,567
Несправність контрольно-виміральної апаратури	7,5
Помилки, допущені в проектній документації	6,5
Дефекти в елементах устаткування	5,333
Несправність елементів основного технологічного устаткування	5,833
Помилки в розробленні технологічного режиму	5,867
Порушення правил безпеки експлуатації технологічного устаткування	29,5
Неякісно виконаний профілактичний ремонт устаткування	12,867
Порушення правил ремонту устаткування	12,9
Корозія стінок елементів устаткування й трубопроводів	5,133
Інші причини	9,4

Наприклад, горючі гази, що перебувають у технологічному устаткуванні, унаслідок його руйнування можуть потрапити до виробничого приміщення. У разі ушкодження корпусу апарата або зриву кришки можливий миттєвий викид горючого газу в приміщення й утворення вибухонебезпечної концентрації суміші за кілька секунд. Через розрив трубопроводу відбувається витік горючої суміші, тому можливе утворення вибухонебезпечної концентрації в приміщенні протягом кількох хвилин. Якщо наявний повільний витік газу, наприклад, через запірну арматури, вибухонебезпечна суміш утворюється протягом часу, якого цілком достатньо для активування роботи витяжної вентиляції й інших протипожежних, противибухових засобів захисту. У кожному конкретному випадку кількість газу,



що потрапила в атмосферу приміщення, може бути визначена з деяким допущенням, якщо відомий апарат або група апаратів, що ставлять до ймовірних джерел аварійного утворення вибухонебезпечної суміші.

Під час експлуатації вибухонебезпечних виробництв найбільша кількість вибухів відбувається внаслідок порушення правил. Приміщення категорій А і Б за вибухо- й пожежною небезпекою, відповідно до чинних норм в Україні (ДСТУ Б. В. 1.1-36 : 2016 [10]), потрібно оснащувати зовнішніми легкоскридними конструкціями (ЛСК). У документі зазначено, що площу ЛСК необхідно визначати за розрахунками. Однак у сфері протипожежного нормування рекомендації з розрахунків параметрів ЛСК нині відсутні. Існує методика розрахунків вибухостійкості будинків у разі внутрішнього дефлаграційного вибуху газоповітряних сумішей [11]. У 2006 р. розроблено «Технічний кодекс встановленої практики», що чинний у Республіці Білорусь – ТКП 45-2.02-38-2006 (02250) [12]. Функціують закордонні стандарти, наприклад, стандарт США «NFPA 68» [13], стандарт Великобританії «BSEN 14491:2012» [14].

## **1.2. Обставини та наслідки вибухів**

Термін «випадковий вибух» охоплює широкий спектр вибухів, кожен конкретний випадковий вибух, принаймні в окремих своїх виявах, відрізняється від інших. У працях [15, 16] описано деякі з добре вивчених випадкових вибухів, а в [17] – вибухи водню. На нашу думку, варто об'єднати деякі випадкові вибухи в групи, кожна з яких має відмінні риси, властиві лише їй. Досягнутий ступінь розуміння обставин, що призводять до вибухів, і механізми перебігу вибухів сильно відрізняються в межах різних груп (типів). Крім того, вибухи здатні породжувати якісно інші руйнування, порівняно з іншими типами. У зв'язку з цим, повнота обговорення кожного залежить від ступеня розуміння явища та його здатності зумовлювати руйнування.

Унаслідок детонації конденсованих вибухових речовин, генерується практично ідеальна вибухова хвиля. Подібні вибухові речовини закладені

здебільшого в оболонку, що певною мірою ослаблює вибухову хвилю. Якщо відомі маса й форма оболонки, то оцінити ушкодження вибухом й осколками достатньо просто [16–18]. Відомо, що вибухи порохів призводять до менших руйнувань [19]. Такі вибухи можуть відбутися (і насправді це відбувається) під час виробництва, транспортування, зберігання й використання вибухових речовин і порохів. Крім того, вибухи цього типу трапляються на хімічному виробництві в реакторах, дистиляційних колонах, сепараторах і т. ін., якщо випадково допустити в них небажане нагромадження високореакційних речовин.

У працях [20–24] проаналізовано вибух дистиляційної колони бутадієну внаслідок детонації, що випадково утворилася, а також вибух вінілацетилену. У літературі описано низку катастрофічних вибухів вибухонебезпечних речовин (ВР), що відбувалися там, де накопичувалися більші кількості цих речовин. Зокрема, 4 серпня 2020 року приблизно о 17:52 на 9 складі в порту Бейрут розпочалася масштабна пожежа. Після нетривалого часу вона поширилася на 12-й склад, де зберігалася 2750 тонн аміачної селітри, яку конфіскували на судні «MV Rhosus» та зберігали з порушенням вимог безпеки близько шести років [28]. Перший вибух спричинив підняття хмари диму з вогнем, були простежувані хлопкоподібні звуки, схожі на звук феєрверків [28]. Після цього через 15 хвилин відбувся другий більш масштабний вибух, ударна хвиля від якого спричинила повне руйнування багатопверхового бункера елеватора поряд з епіцентром. Вибух зумовив здійснення великої кількості продуктів згоряння, що склалися переважно з токсичного газу діоксиду азоту, який виділився в умовах вибуху під час перебігу хімічної реакції за участі нітратів. У тротиловому еквіваленті така кількість селітри, за висловом експертів [28], становила близько 1850 тонн тротилу (1,85 кт), а за даними аналітика й експерта з озброєнь техаської приватної розвідувальної компанії «Stratfor Сіма Така» – 2,2 кілотонни.

Згідно з останніми офіційними відомостями, унаслідок масштабної техногенної катастрофи в столиці Лівану загинуло майже 140 людей і близько 5000 поранено. Ще приблизно 100 осіб вважають зниклими безвісти. Масштабні випадкові вибухи високоенергетичних ВР і боєприпасів, споряджених подібними

ВР, почастишали після широкого використання цих речовин. Таблиці щодо кількості ВР (відстань, затверджена в США для оцінювання вибухобезпеки) спочатку були ґрунтовані на обробленні відомостей про подібні вибухи [29].

Вибухи газів, пари та пилу в замкнених об'ємах без надлишкового тиску відбуваються, коли пальне витікає в огороження, пари його змішуються з повітрям й утворюється горюча суміш, яка контактує з наявним джерелом запалювання. Виняток становлять вибухи ємкості для зберігання палив, коли простір над паливом заповнений вибухонебезпечною сумішшю. У цьому разі вибух може статися від випадкового джерела. Існують два чітко виражені граничні випадки для вибухів в обмежених об'ємах. Якщо відношення довжини до діаметра об'єму  $L/D \approx 1$  і якщо простір не занадто загромаджений устаткуванням, перегородками й т. ін., то відбудеться просто вибух посудини під тиском. Швидкість підвищення тиску в аналізованих обставинах порівняно невелика, тому спочатку будуть зруйновані найменш міцні деталі, наприклад, вікна й двері. У ситуації однорідної за міцністю конструкції будинку підйом даху та руйнування всіх стін відбудуться одночасно [30]. У приміщеннях із тонким і жорстким огороженням оболонка прагне набути сферичної форми, поки розрив не дасть виходу для продуктів згоряння. Незважаючи на те, що подібні вибухи призводять до серйозного ушкодження оболонки [31, 32], утворена ними вибухова хвиля найчастіше виявляється слабкою. Це можна пояснити тим, що будинки, зазвичай, не є дуже міцними спорудженнями, тому руйнуються або втрачають свою цілісність унаслідок низького надлишкового тиску (від 7 до 70 кПа). Подібні вибухи діють як джерела вибухів із низькою щільністю енерговиділення.

Іншому граничному випадку відповідають вибухи в обмеженому об'ємі, що має велике відношення  $L/D$  або утримує низку перешкод, як-от нагромаджене устаткування чи внутрішні перегородки. Після ініціювання згоряння продукти, що розширюються, зумовлюють рух газу перед фронтом полум'я, генеруючи турбулентність і масштабні вихори в місцях контакту потоку з перешкодами. Це натомість призводить до швидкого збільшення ефективної поверхні полум'я й до підвищення тиску, що посилюється взаємодією полум'я з турбулентністю та

масштабними вихорами. Такий процес може спричинити детонацію газової фази в деяких ділянках об'єму. У областях детонації внутрішній тиск стає дуже високим (близько 1,5 МПа) за короткий проміжок (менш як 1 мс) і зумовлює сильні локалізовані руйнування. Необхідно зазначити, що для цього граничного випадку характерна локалізація максимального руйнування не в точці запалювання, а на найбільш віддаленій від неї ділянці оболонки. Подібні вибухи утворюють сильні вибухові хвилі, повідомляють про високу швидкість осколкам і спричинюють більш серйозні ушкодження навколишніх об'єктів, на відміну від простих вибухів через надлишковий тиск.

Будь-який обмежений простір у приміщенні, спеціально не призначений для обертання вибухових речовин, може вибухнути, якщо він виявляється заповненим горючими парами або газом і є джерелом запалювання. У праці [33] описано понад 200 вибухів печей або котлів, опалюваних газом чи рідким паливом, зумовлених неправильною експлуатацією або несправністю. Це переважно прості вибухи через надлишковий тиск. У праці [34] репрезентовано кілька прикладів вибухів у закритому просторі в морських припортових спорудах. Більшість подібних вибухів відбувається в просторі зі співвідношенням  $L/D \approx 1$ , подібно до описаних вище простих вибухів через надлишковий тиск. Однак деякі вибухи зумовлювали сильні локальні ушкодження, що характерне для вибухів із більшим відношенням  $L/D$ .

У складах із вибуховими речовинами витиснуті з приміщень пари пального утворювали хмару, яка була запалена певним невідомим джерелом. Полум'я проникнуло в них і розвинулося в детонацію. Уся покрівля приміщення була підкинута нагору приблизно на 250 м. Унаслідок вибуху загинуло шість людей, троє пропали безвісти, поранено 58 осіб. Збитки від вибуху становлять 21,6 млн доларів [35]. Цей вибух стався внаслідок зовнішнього запалювання пари пального. Багато аналогічних вибухів породжені статичними зарядами (іскрами), які виникають під час технологічного процесу [36, 37].

Житлові будинки також вибухають досить часто, причому наслідки вибуху засвідчують, що відбувається поширення та пришвидшення полум'я. Один із подібних вибухів описаний у праці [38].

Вибух пилу в замкненому об'ємі може привести до катастрофічних наслідків [39]. Усупереч поширеному уявленню, практично всі органічні пили й деякі неорганічні або металеві пили згоряють у повітрі, можуть привести до вибухів у замкнених об'ємах. Однак причини, що породжують вибух пилів, відрізняються від причин, що зумовлюють вибухи газів або парів. Для того щоб хмара пилу вибухнула, необхідна досить висока концентрація пилу, наприклад така, за якої характерна відстань поглинання й розсіювання світла становить приблизно 0,2 м. Такі хмари, зазвичай, непрозорі, концентрація пилу в них вища від тієї, що може витримати людина. Ці умови не реалізовані на робочому місці, їх досягають лише всередині трубопроводів і спеціального устаткування. Типова послідовність подій у разі вибуху пилу така [39]: спочатку відбувається невеликий вибух у якій-небудь частині устаткування; потім у разі забрудненого робочого місця рух газу й вібрація устаткування, які виникають після першого вибуху, призводять до того, що шар пилу в приміщенні піднімається в повітря. Цей пил є паливом для сильного другого вибуху, який і породжує основні руйнування. В іншій типовій ситуації маса пилу починає займатися або через спонтанне samozапалювання, або через те, що шар пилу покриває гарячу ділянку устаткування (наприклад, кожух електромотора, патрон лампи). Робітник, виявивши вогнище горіння, намагається ліквідувати його за допомогою хімічного вогнегасника або струменя води [39]. Пил здіймається, утворюється хмара з достатньою кількістю пилу, частина якої горить, тому відбувається вибух. Для вибухів пилу в приміщенні, як і для вибухів газів і пар, характерне існування двох граничних випадків. У замкненому об'ємі з малим відношенням довжини до діаметра ( $L/D \approx 1$ ) очікують простого вибуху через надлишковий тиск [39]. У конструкціях із більшим відношенням  $L/D$  може виникати пришвидшення полум'я аж до детонаційної швидкості. За таких умов руйнування мають локальний характер і серйозні наслідки. Осколки розлітаються на велику відстань, а зовнішня вибухова хвиля може бути досить сильною [39].

Вибухи пилу в замкненому просторі мають більш тривалу історію, ніж вибухи пари й газів. Це аргументоване тим, що пара й газу як паливо почали використовувати порівняно недавно. Вибухи ж пилу відбуваються в котельнях, на

хімічній промисловості, у фармацевтичній індустрії [40], вугільних шахтах, на борошномельних підприємствах. Опис літератури щодо вибухів зернового пилу представлено в працях [41, 42]. Загальна характеристика вибухів пилу запропонована в розвідках [43, 44]. Вибухи на вугільних підприємствах трапляються з часу початку промислової революції. Більшість промислово розвинених країн має програми, спрямовані на дослідження вибухів [45–48]. Нині сформоване розуміння причин і механізмів вибухів. Горіння, що переходить у вибух, простежуване під час виділення й запалювання метану. Потім вибух поширюється на велику відстань як вибух вугільного пилу, тому що вилучити весь пил у шахті надзвичайно дорого. У праці [46] зібраний матеріал, який демонструє, що за період із 1900 р. до 1951 р. відбулося 135 катастроф у вугільних промислових енергетичних підприємствах. Катастрофою вважали вибух, за якого гинуло 50 або більше людей. У цих катастрофах загинуло 20448 людей, або в середньому 151 особа на одну катастрофу. Статистика доводить, що в США за період із 1931 р. до 1955 р., унаслідок вибухів у шахтах, за рік гинуло в середньому 117 людей. Це набагато менше, ніж за період із 1971 р. до 1980 р., коли гинуло в середньому 330 осіб щороку. На жаль, як великі, так і малі вибухи в шахтах тривають донині, від них люди не убезпечені й надалі.

Вибухи пилу на зернових елеваторах і в борошномельній промисловості також мають тривалу історію. У праці [49] подано огляд подій із 1876 р., що відображають аналогічні ситуації: шар пилу піднімається нагору початковим вибухом – і відбуваються вторинні катастрофічні вибухи. Щороку на зернових елеваторах США та інших країн фіксують від 30 до 40 вибухів. У грудні 1977 р. за п'ять днів констатовано два катастрофічні вибухи [50]. Вибух на «Континентал грейн» в Уестуего (шт. Луїзіана) 22 грудня 1977 р. призвів до загибелі 36 людей і збитку на 30 млн доларів. Унаслідок вибуху на зерновому елеваторі «Фармере експорт» у Галвестоне (шт. Техас) 24 грудня 1977 р., загинуло 18 людей, а матеріальні втрати сягнули 24 млн доларів. Ці два вибухи суттєво понизили здатність США експортувати зерно. Вибухи пилу в хімічній і фармацевтичній промисловості частіше відбуваються лише в устаткуванні. Основною причиною є

те, що продукт виробництва дорогий, тому наявний ретельний контроль над відсутністю пилу. Якщо ж устаткування спеціально не захищене, можуть відбуватися суттєві руйнування.

Причини простих вибухів посудин під тиском диференціюють на дві групи [39]. До першої належать порушення цілісності корпусу, наприклад, через несправність якого-небудь вузла, ушкодження або корозію корпусу, неправильну експлуатацію. При цьому посудина може вийти з ладу в будь-який час. Інша група аварій пов'язана з перегрівом посудини, наприклад, через порушення електрообігрівання [39] або режиму роботи топкового обладнання. У цьому випадку тиск газу підвищується, а міцність корпусу знижується доти, поки не відбудеться ушкодження посудини. Верхню оцінку параметрів вибуху одержують у разі використання залежностей для крихких посудин. Реальні вибухи будуть менш інтенсивними, тому що пластична посудина розривається повільно. Первинні осколки, утворені подібними вибухами, бувають дуже небезпечними.

Трапляються й вибухи посудин під невеликим тиском [39]. Наприклад, великий паровий котел загального призначення вибухає, якщо внутрішній тиск підвищиться лише на 10...15 кПа. Підвищення тиску фіксують унаслідок як вибуху під час горіння в топці, так і витоку пари в топку, зумовленого ушкодженням великої труби або водяного колектора. У цьому випадку пара надходить у топку з такою швидкістю, що скидання надлишкового тиску стає неможливим [39]. Через наростання тиску котел роздувається, округлюється й може просто деформуватися без руйнування. Аварія набуває більш серйозного характер, коли котел руйнується. Подібні аварії спричинюють невеликі руйнування навколишнього устаткування, хоч котел зазнає помітних ушкоджень.

Магістралі зі стисненим повітрям чутливі до вибухів, породжених горінням. Паливом у цьому випадку є масляні або нагаромастильні відкладання на стінках. Подібні вибухи описані в працях [51–57]. За таких вибухів руйнування локалізовані, що типово для вибухів у посудинах із великим відношенням  $L/D$ . Один із вибухів відбувся внаслідок несправності устаткування: пари компресорного масла змішалися в магістралі зі збагаченим киснем повітрям і

здетонували. У багатьох місцях по кілька метрів магістралі виявилися розщепленими на довгі смуги, особливо в місцях вигину труби. Унікальний вибух трубопроводу, зумовлений екзотермічним розпадом і подальшою детонацією ацетилену під високим тиском, описаний у [58]. Детонаційна хвиля пройшла по трубі шлях довжиною приблизно 11 км. Однак конструкція була вдалою, і труба не розірвалася. Крім того, поглинач детонації зупинив поширення детонації, поки вона ввійшла в реактор.

Руйнування в разі вибухів газових ємностей із подальшим горінням в атмосфері подібні до описаних вище. Основна відмінність полягає в утворенні вогненної кулі, розмір якої залежить від кількості газоподібного пального, викинутого в атмосферу. Коли в ємності перебуває газоподібне паливо, його кількість набагато менша від тієї, що може зберігатися в тій самій ємності в рідкому вигляді. Наслідки цих вогненних куль не настільки серйозні, як вибухів ємностей із перегрітою рідиною.

Вибухи хімічних реакторів відбуваються здебільшого тому, що порушується система контролю над реакцією, зазвичай, екзотермічною. Наприклад, у разі занадто великої кількості каталізатора виходить із ладу система охолодження, порушується перемішування й т. ін. Вибух цього типу відрізняється від вибуху внаслідок детонації вмісту реактора. Якщо хімічний реактор виходить із-під контролю, швидкість підвищення тиску стає суттєво нижчою, реактор руйнується, як еластичне тіло. Якщо реактор газовий, то руйнування відповідає вибуху посудини під тиском. Якщо реактор рідинний із температурою вищою від температури кипіння, то вибух фіксують за типом вибухів посудин із перегрітою рідиною. У працях [59, 60] описано катастрофічний вибух нітроанілінового реактора й вихід із-під контролю реакції в ємності, що містить забруднений паранитрометакрезол. Наслідки вибухів хімічних реакторів позначаються лише на виробництві, хоч в окремих випадках може постраждати й населення.

У численних розробках схарактеризовано потенційні наслідки виходу з-під контролю реактора та (або) руйнування його елементів. Деякі з прогнозів допускають катастрофічне руйнування реактора або через неконтрольований



розвиток хімічної реакції, або через простий вибух за підвищеного тиску. Ці реактори сконструйовані так, щоб аварії не могли привести до чого-небудь, що хоча б віддалено нагадує вибух бомби. В одному з прогнозів наведено сценарій найбільш серйозної аварії руйнування реактора, виходу газово-повітряної суміші реактора та (або) системи захисту, що призводить до фізичного вибуху внаслідок перемішування з більш холодним повітрям поза реактором. Якщо вихід із-під контролю технологічного процесу породжує руйнування корпусу, то ушкодження, заподіяні вибухом, можна не брати до уваги. Викид реагуючої суміші з високою концентрацією вибухонебезпечного газу завдасть настільки серйозних збитків усьому оточенню, що ушкодження, зумовлені вибухом, оцінять як несуттєві.

Ці вибухи трапляються через розрив ємності з рідиною, тиск пари якої перевищує атмосферний. Послідовність подій така [61]: пластикна ємність із перегрітою рідиною починає руйнуватися з певних причин; оскільки ємність пластикна, то процес руйнування порівняно повільний; утворюється нечисленна кількість великих осколків. Ці осколки, на внутрішній поверхні яких перебуває швидковипарна рідина, можуть набувати більшої швидкості й розлітатися на велику відстань. Вибухова хвиля, утворена таким вибухом, зазвичай слабка. Як зазначено в праці [62], випар рідини повільний і зумовлює лише невелике підвищення тиску. У першому наближенні можливо оцінити максимальну інтенсивність вибухової хвилі, якщо відомий об'єм над перегрітою рідиною в момент вибуху ємності.

Ситуація ускладнена, якщо рідина в ємності горюча й вибух породжений полум'яним нагріванням. За таких умов вибух призводить до появи підживлюваної паливом вогняної кулі, тривалість горіння й розмір якої визначають за загальною масою рідини в ємності на момент вибуху. Якщо ємність більша, то випромінювання від цієї вогняної кулі може привести до опіків, запалити легкозаймісті матеріали, що перебувають поряд.

Найбільш небезпечні вибухи описуваного типу відбулися на залізничному транспорті. Аварії траплялися із залізничними цистернами, що перевозять горючі зріджені гази: нафтовий газ, пропан, пропилен, бутан, вінілхлорид і т. ін. Типовий

розвиток аварії починався з того, що вантажний поїзд, у складі якого було кілька цистерн, зчеплених разом, сховався із рейок. Цистерни нагромаджувалися одна на одну; порушувалася цілісність або системи напуску, або цистерни. Газ, що виходить, загорявся. Факел, який утворювався, нагрівав сусідні цистерни, що приводило до відкриття запобіжних клапанів і появи нових факелів. Передання тепла від факелів до цистерн у підсумку породжувало вибухи, що зумовлювали перенакопичення цистерн, викид окремих шматків цистерн, утворення невеликої вибухової хвилі й вогняної кулі. Пожежі тривали довгий час, нагромаджені цистерни протягом 3-4 годин, а іноді й упродовж кількох днів по черзі вибухали [63]. Зафіксовані випадки, коли відбувалося до шести вибухів такого типу.

У праці [64] описано 84 подібні аварії. Зауважено, що розкиду значень радіуса розльоту осколків підпорядковане закону нормальної ймовірності розподілу. За наявними відомостями [64], 95 % усіх осколків, незалежно від їхнього розміру, перебувало в радіусі 700 м. Вогняна куля від однієї із залізничних цистерн у США місткістю 88 м<sup>3</sup> охопила ділянку земної поверхні радіусом 60 м і запалила горючі матеріали в радіусі 350 м. Попри те, що ушкодження, до яких призвів вибух, можуть і не бути суттєвими, реальні наслідки аварії подібного типу стають катастрофічними.

Хімічні реактори, що містять під високим тиском рідину, у якій відбувається екзотермічна хімічна реакція, – потенційне джерело аварії, подібної до сценарію з вибухом ємностей із перегрітою водою, температура якої вище від 100 °С, а тиск пари перевищує атмосферний.

Вибух необмеженої хмари пари відбувається внаслідок рідкісного збігу обставин [65]. По-перше, необхідний масовий викид пального (наприклад, вуглеводню) або в атмосферу, або в поверхню землі. Описана подія можлива як на хімічному підприємстві, так і під час перевезення пального, у разі вибуху газопроводу. Після викиду пального в атмосферу явище розвиватиметься за чотирма напрямками: 1) викинуте пальне розсіюється без запалення; 2) під час викиду пальне загоряється; інцидент завершується тільки пожежею без вибуху; 3) викинуте пальне розсіюється на великій площі; після деякої затримки хмара

запалюється й відбувається масова пожежа; 4) послідовність подій така сама, як і за третім напрямом, але після початку пожежі полум'я помітно збільшується й утворюється небезпечна вибухова хвиля.

У працях [66, 67] запропоновано статистичні відомості, описано низку питань вибуху необмеженої хмари пари [68–72]. У роботі [73] описано вибухи хмар, що трапилися, з'ясовано їхні основні риси.

Вибухи необмежених парових хмар вражають та є надзвичайно небезпечними. У разі великого витоку в атмосферу енергоносія в певних метеорологічних умовах утворюються величезні хмари горючої суміші. Донині найбільших збитків завдав вибух хмари пари, що трапився на заводі «Ніпро кемікл плант» близько Фліксборо (Англія) у червні 1974 р. Обставини вибуху ретельно вивчали дослідники [74–76]. Підсумовано, що тимчасово приєднана труба діаметром 0,5 м із двома сільфонами вийшла з ладу, зумовивши викид через два отвори розміром 0,7 м приблизно 45 т циклогексану, що перебував за температури 155 °С і тиску 850 кПа. Це пальне швидко випарувалося, утворилася велика хмара. Запалювання відбулося, цілком імовірно, від печі водневого цеху, що перебував на деякій відстані від місця витоку. Запалювання було «м'яким», спочатку виникла велика пожежа, а потім унаслідок пришвидшення полум'я утворилася ударна хвиля, яка зумовила серйозні руйнування заводу й будинків на відстані до півтора кілометра. Загибло 28 людей, поранено – 89. Збитки заводу й навколишньої території оцінюють у 100 млн доларів.

Вибух цукрового заводу в штаті Джорджія (США) спричинив промислову катастрофу, що сталася 7 лютого 2008 р. у Порт Вентворт, Джорджія, Сполучені Штати. Чотирнадцять людей загинуло та сорок поранено, коли відбувся вибух пилу. Цукровий завод належав фірмі «Імператорський цукор». Пилові вибухи стали причиною занепокоєння серед владних структур Сполучених Штатів після трьох нещасних випадків зі смертельним наслідком у 2003 році. Тоді зусилля спрямували на підвищення безпеки та зменшення ризику повторення.

Нафтопереробний завод керувався в роботі застарілими методами, що позначилося на тяжкості пожежі. Вибух стався в підвалі, де зберігали силоси.

Після катастрофи запропоновано нове законодавство про безпеку. Місцева економіка занепала, оскільки завод був закритий. «Імперіал» мав намір відновити його та повернути до виробництва до кінця 2008 року, а замінені будівлі завершити до наступного літа. Деякі потерпілі подали позови про відшкодування збитків проти власника, компанії, яка їх найняла щоб прибирати НПЗ. Вибух став основною причиною великих збитків у першому кварталі 2008 року.

Аварію в окрузі Франклін (шт. Міссурі) [79] називають унікальною, тому що хмара пари вибухнула як єдине ціле [80]. Вибухнув підземний трубопровід, і пропан під тиском 7 МПа утворив фонтан над трубопроводом. Після детонації утворилася вогняна куля, оскільки більша частина паливо-повітряної суміші виявилася занадто великою для того, щоб повністю прорити. Аварія не мала суттєвих руйнувань через невеликі забудови в цьому районі.

Відповідно до відомостей [80], тротильовий еквівалент вибуху в окрузі Франклін становив приблизно 7,5 % енергії, визначеною за теплою згорання всього пролитого пального. Тротильові еквіваленти вибухів у Фліксборо й Іст-Сент-Луїсу сягнули 5 % [81] та 0,2 % [78] від розміщеної енергії. Як грубе наближення для оцінювання руйнувань під час вибуху необмежених хмар можна прийняти 2 % (для верхнього оцінювання – 10 %) теплоти згорання всього пролитого пального.

Зафіксовано численну кількість аварій, коли паливо загорялося без утворення руйнівної вибухової хвилі [79, 45]. Один із найбільших витоків пального виявили в Гриффіті (шт. Індіана) у 1974 р. [82]. Труба діаметром 0,4 м, приєднана до підземного резервуара ємністю 45000 м<sup>3</sup>, що містить рідкий бутан під тиском 19,6 кПа, відкрилася в І-Секції. Через сопло паливо виривалося вертикально нагору протягом 7 год., перш ніж відбулося загорання. Запах паленого відчувався на відстані 24 км у напрямку вітру в Гейрі (шт. Індіана). Після загорання полум'я перекинулося до сопла, поступово утворювався факел без генерації руйнівної вибухової хвилі.

Фізичний (паровий) вибух відбувається, коли інтенсивно перемішуються дві рідини, що мають різні температури, або коли тонкорозмелена гаряча тверда речовина швидко перемішується з набагато більш холодною рідиною. Вибух

відбувається не через хімічну реакцію, а тому, що за швидкоплинного переходу рідини в пару локально підвищується тиск. Подібні вибухи фіксували в сталеливарній, алюмінієвій промисловості, коли рідкий метал заливався у вологий контейнер. Вибухи також траплялися, коли рідкий природний газ потрапляв на воду. У цьому випадку холодною рідиною був рідкий природний газ, а не вода.

Без сумніву, фізичні вибухи є важливим або потенційно важливим типом вибухів. Експериментальному й теоретичному дослідженню фізичних вибухів присвячено праці [83–89]. Учені висловлюють припущення, що за певних умов фізичні вибухи можуть поширюватися в режимі детонації [90–92]. Однак, на жаль, у зазначених розвідках немає єдиної думки стосовно механізму, що призводить до фізичного вибуху, а також відсутні коректні методи оцінювання енергії вибуху або ролі оболонки в розвитку вибуху.

### **1.3. Конструктивні особливості безінерційних легкоскридних конструкцій**

Висока надійність і незалежність розкриття ЛСК – основна вимога, що має бути дотримана під час вибору їхніх конструктивних параметрів. У разі використання ЛСК стекол глухого скління їх потрібно кріпити безпосередньо до елементів віконного плетіння (віконної панелі) за допомогою металевих штапиків (куточків), по краях скла, окантованих ущільнювальним гумовим профілем, як під час обладнання глухого скління невибухонебезпечних приміщень виробничих будинків [111–114].

Поверхню скла, по якій воно порізане, доцільно розташовувати у віконному плетінні так, щоб вона була звернена вбік вибухонебезпечного приміщення. Це підвищує ефективність розкриття ЛСК у разі аварійного вибуху. Оскільки під час обладнання скління зазначене розташування поверхні скла не гарантоване, то в розрахунках ЛСК беруть до уваги, що поверхня скла може бути звернена в протилежний бік.

Для обладнання подвійного й потрійного глухого скління використовують листове скло та склопакети. Доцільно, щоб скло, умонтоване у віконних

прорізах за подвійного й потрійного скління, мало практично однакові розміри [111–114].

До надрізання стекол для підвищення ефективності їх розкриття в разі внутрішнього аварійного вибуху потрібно вдаватися тільки тоді, коли це може бути взяте до уваги в ході визначення коефіцієнта  $K_{\text{вскр}}$ . Крім того, має бути забезпечена необхідна міцність стекол у випадку дії на них вітрового навантаження.

Кріплення віконних плетінь (віконних панелей) зі стеклами глухого скління, використовуваними як ЛСК, до несучих конструкцій та елементів зовнішнього огороження вибухонебезпечного приміщення (колон, перемичкових панелей, імпостів і т. ін.), а за потреби – і між собою, виконують так само, як і для обладнання скління невибухонебезпечних приміщень виробничих будинків. Необхідну міцність кріплень визначають за розрахунками, зважаючи на вибухове навантаження, що діє на віконне скління (віконну панель) [111–114].

За умов використання як обертальних ЛСК стулок, що відкриваються, віконних плетінь (віконних стулок) стекла кріплять так само, як і за глухого скління. Міцність стекол повинна бути досить високою. Доцільно практично унеможливити руйнування стекол як у разі розкриття ЛСК (під дією вибухового навантаження), так і внаслідок різкого гальмування стулки за наявності обладнання, що обмежує її поворот під час розкриття.

Для скління, що відкривається, при влаштуванні віконних стулок застосовують листове скло та склопакети. На відміну від глухого скління, наявність віконних стулок практично не позначається на ефективності склопакетів для ЛСК, що відкриваються.

У разі обладнання одинарного скління монтаж внутрішніх віконних стулок проводять так само, як і для стулок, що відкриваються назовні, у скління невибухонебезпечних приміщень виробничих будинків. За умов обладнання подвійного скління перевагу надають спареним стулкам, що відкриваються (спареним плетінням), а за обладнання потрійного скління – потрійним стулкам, що відкриваються (потрійним плетінням). Принципові схеми установаження стулок,

що відкриваються, у віконних плетіннях під час обладнання одинарного скління та в спарених плетіннях у ході обладнання подвійного скління продемонстровано на рис. 1.1. Обладнуючи подвійне, особливо потрійне, скління, замість спарених і потрійних, що відкриваються, віконних стулок використовують віконні стулки, що відкриваються, з установленими в них дво- й тришаровими склопакетами. За потреби для ущільнення притворів стулок застосовують пружні гумові або синтетичні прокладки [111–114].

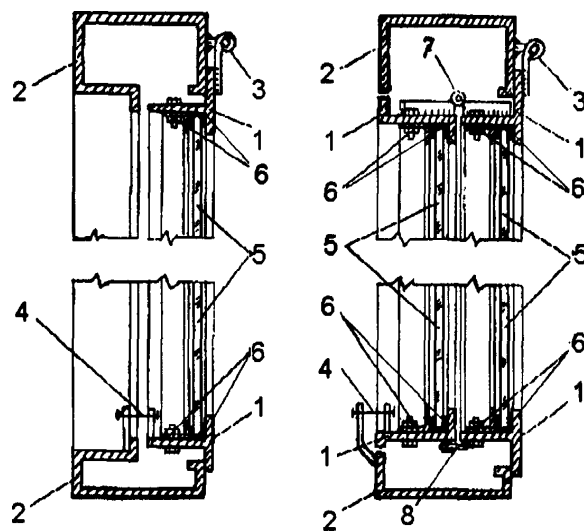


Рис. 1.1. Принципові схеми влаштування ЛСК у вигляді стулок, що відкриваються, віконних плетінь за одинарного скління (а) та за подвійного скління (спарене плетіння): 1 – стулка, що відкривається; 2 – нерухомі елементи віконного плетіння; 3 – шарнір, що забезпечує обертання ЛСК; 4 – обладнання, що утримує ЛСК у закритому стані; 5 – скло; 6 – закріплені на болтах металеві штапики й ущільнювальний гумовий профіль; 7 – шарнір, що дає змогу розкривати спарені стулки для протирання стекол; 8 – обладнання, що утримує спарені стулки в зімкнутому стані.

Особливу увагу в проектуванні віконних стулок, що відкриваються та використовуваних як ЛСК, звертають на влаштування, яке утримує стулку в зачиненому стані та спрацьовує в разі аварійного вибуху. Це влаштування може мати різні конструктивні рішення, причому основний робочий елемент під час спрацьовування може не руйнуватися (наприклад, за використання пружинних засувки) або руйнуватися (від вигину, розтягання, зрізу й т. ін.). Найбільш

перспективними вважаємо улаштування з робочими елементами, що руйнуються від розтягання. Принципова схема такого обладнання подана на рис. 1.5 [111–114].

Згідно зі схемою, зображеною на рис. 1.2, улаштування, що утримує стулку в зачиненому стані, за допомогою стійок 1 і 2 кріпиться (зварюванням або на болтах) до стулки, що відкривається, і до нерухомого елемента віконного плетіння (див. рис. 1.4). На стійці 1 є гак для фіксації положення розривного елемента 3. Інший гак для фіксації положення розривного елемента 3 прикріплено до встановленої на стійці 2 рухомої деталі 4. Необхідний зсув 2 цієї деталі стійки, фіксується за допомогою натяжного гвинта 5. Гвинт 5 забезпечує необхідний попередній натяг розривного елемента 3 і підтискання стулки, що відкривається, до віконного плетіння [111–114].

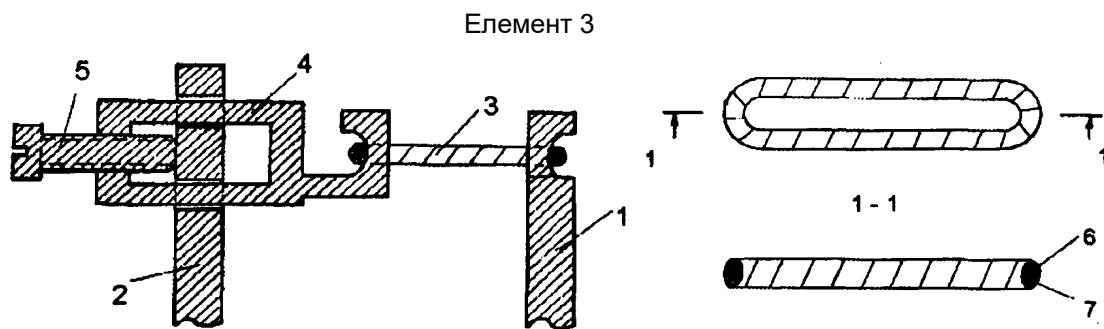


Рис. 1.2. Принципова схема обладнання, що утримує віконну стулку та відкривається, у зачиненому стані: 1 – стійка, що кріпиться до стулки, яка відкривається; 2 – стійка, що кріпиться до нерухомого елемента віконного плетіння; 3 – розривний елемент; 4 – рухома деталь; 5 – натяжний гвинт; 6 – м'який дрiт; 7 – захисне обмотування (лакофарбове покриття).

Високої надійності спрацьовування (розриву в разі розтягання) елемента 3 досягають під час його виготовлення у вигляді мотка (див. деталь на рис. 1.2) із м'якого (із майданчиком плинності) тонкого дроту. Дрiт, призначений для виготовлення елемента 3, повинен бути випробуваний на розрив. Після цього, з огляду на зусилля, за якого має відбуватися спрацьовування розривного елемента 3, визначають кількість ниток дроту в мотку [111–114].



Зусилля, за якого має відбуватися спрацьовування (розрив) елемента 3, залежить від кількості елементів, установлюваних на одній стулці, що відкривається, прийнятої величини  $\Delta p_{\text{вискр}}$ , розмірів стулки. Під час заводського виготовлення елементів 3 на них зазначають зусилля, що спричинює розрив елемента. Фактичні зусилля, що зумовлює розрив елементів 3, з імовірністю 0,9 не повинні відрізнятись більш ніж на 10 % від розрахункового зусилля. Для зменшення мінливості розривних зусиль в окремих елементах доцільно, щоб кількість ниток дроту, що працюють на розтягання, була не менше від шестидесяти [111–114].

За необхідності захисту від корозії або від інших несприятливих впливів елементи 3, виконані у вигляді мотків дроту, ізолюють від зовнішнього середовища (через улаштування захисної оболонки, обмотки ізоляційним матеріалом, нанесення лакофарбових покриттів і т. ін.).

У ході проектування віконних стулок, що відкриваються та використовуювані як ПК, необхідно запобігати появі факторів (примержання, заклинювання й т. ін.), що суттєво підвищують рівень надлишкового тиску (порівняно з прийнятою величиною  $\Delta p_{\text{вискр}}$ ), за якого починається розкриття ЛСК. Зокрема, необхідно унеможливити влучення й нагромадження вологи в притворах, особливо в шарнірних влаштуваннях. Для цього використовують козирки й інші влаштування, що запобігають влученню, зменшують імовірність вологи, що з'являється в разі випадання опадів у вигляді дощу. Крім того, необхідно, щоб зовнішній бік обв'язки стулки, що відкривається, виходив за межі контуру, який перекриває проріз у віконному плетінні (див. рис. 1.1) [111–114].

Стулка, що відкривається, виконана з матеріалів, які не іскряться (наприклад, з алюмінієвих сплавів). Передбачено заходи, які унеможливають утворення іскор у разі співудару стулки з нерухомими елементами віконного плетіння (наприклад, система прокладок, що не іскрять у притворах).

Шарніри (підвісні обладнання), які забезпечують обертання як ЛСК віконних стулок, що відкриваються, виготовлені зі сталі, якщо немає небезпеки

корозії стосовно один одного (тертьових) у разі відкривання стулки поверхонь шарніра [111–114].

#### **1.4. Конструкція безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами**

Один із сучасних різновидів вікон – вікна з полікарбонату. Порівняно зі звичайними різновидами, ці вікна виготовляють із полікарбонату, здатного зберігати тепло на високому рівні, протистояти навіть найдужчим перепадам температури, а також бути стійким до різноманітних ушкоджень. Багато фахівців рекомендують використовувати полікарбонатні вікна в тих приміщеннях, де необхідно підвищити рівень звукоізоляції чи проникнення світла.

Фактично такий виріб найчастіше складається з пластикового, металевого, металопластикового, рідко – дерев'яного каркаса й вставленого в нього стільникового або монолітного полікарбонату. Вікно дуже схоже на євровікно, тільки замість скла використано полікарбонат. У житлових приміщеннях полікарбонатні вікна почали використовувати недавно. Такий унікальний матеріал, як стільниковий полікарбонат здатний розсіювати світло. Ці вікна здебільшого виготовляють глухими, тобто не передбачено їх відчинення, що має так званий декоративний характер.

Застосовують вікна й з монолітного полікарбонату, які почали виготовляти також недавно. За всіма параметрами монолітний полікарбонат кращий від звичайного скла, він легший, міцніший і безпечніший. Крім того, вони мають таку саму прозорість, як і скло. Аналізовані вікна виготовляють за принципом склопакета, природно, що вони можуть відчинятися. Єдиний недолік цих вікон – ціна. Монолітний полікарбонат для вікон виготовляють за спеціальною технологією, яка передбачає високий ступінь очищення полікарбонату від домішок, що надає матеріалу максимальної прозорості, у зв'язку з чим його ціна вища від звичайного полікарбонату.

Незаперечними перевагами вікон є те, що їх використання дає змогу зробити житло більш комфортним. Водночас варто зауважити, що не кожен виробник спроможний забезпечити їхню високу якість. Приклади віконних систем із полікарбонату подано на мал. 1.3.



Рис. 1.3. Приклади вікон із полікарбонату

Перспективними для виготовлення ЛСК є віконні системи зі стільникових полікарбонатних листів, зовнішній вигляд яких зображено на рис. 1.4.

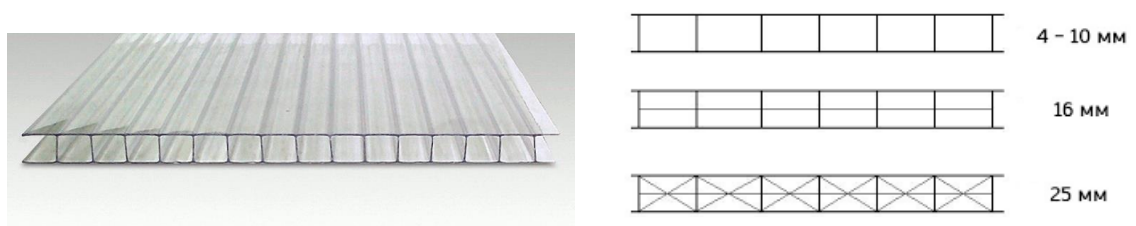


Рис. 1.4. Конструкція стільникових полікарбонатних листів

Застосування цього матеріалу вможливить багаторазове використання гнучких елементів, скорочення трудових і матеріальних витрат на монтаж та установлення.

## 1.5. Мета і задачі досліджень

Враховуючи вищевикладене були сформульовані ідея, мета роботи і основні задачі дослідження.

*Ідея роботи* полягає у забезпеченні належного захисту проти вибуху за допомогою безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами шляхом розроблення розрахункової методики їх проектування.

*Мета роботи* полягає у розкритті закономірностей поведінки гнучких огорожувальних елементів безінерційних легкоскидних конструкцій та умов їх спрацювання під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху залежно від їх конструктивних параметрів як підґрунтя щодо розроблення відповідної розрахункової методики проектування.

### *Основні задачі дослідження.*

1. Провести аналіз сучасного стану із нормування та проектування легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами.

2. Розробити математичну модель поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

3. Розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

4. Розробити методику та визначити ефективні характеристики деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів та умов їх виходу із замків стандартного виконаного профілю легкоскидних конструкцій, що улаштовані на їх основі.

5. З урахуванням виявлених ефективних характеристик деформування стільникових полікарбонатних листів гнучких елементів та умов їх виходу із замків стандартного виконаного профілю виявити закономірності залежностей

параметрів спрацьовування відповідних легкоскидних конструкцій від конструктивних параметрів.

6. Розробити розрахунковий метод проектування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху шляхом побудування відповідних номограм та таблиць.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

#### ПОВЕДІНКИ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СТІЛЬНИКОВИХ ЛИСТІВ ПІД ВПЛИВОМ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ

##### 2.1. Навантаження на елементи конструкцій за умов впливу вибуху

Одне з основних завдань вибухобезпеки – визначення навантаження, що діє на елементи конструкцій під час вибуху горючих газо-, паро- й пило-повітряних сумішей усередині приміщення. Теорія горіння, вибуху та детонації горючих сумішей описує процеси, пов'язані з явищами вибухового горіння за їх протікання в трубах й інших просторах, що схарактеризовано в працях [10, 93, 94, 102]. Вибухи горючих сумішей у більших об'ємах, порівняно з об'ємами промислових будинків, нині вивчені недостатньо. У зв'язку із цим, під час розв'язання практичних завдань щодо захисту будинків вибухонебезпечних виробництв від руйнувань варто для побудови моделі визначення величини й характеру вибухових навантажень, що діють на будівельні конструкції, свідомо приймати такі вихідні дані, які дають змогу одержувати надійні результати стосовно забезпечення вибухозахисту.

Основна ідея захисту промислових будинків від вибуху горючих сумішей усередині приміщення полягає в забезпеченні міцності й стійкості несучих конструкцій, запобіганні руйнуванню або розкриттю спеціальних ЛСК за мінімальних навантажень (імпульс, тиск). У ході розв'язання практичних завдань вибухозахисту промислових будинків і споруджень необхідно дібрати площу та параметри ЛСК для зниження навантажень до безпечних величин, правильно розрахувати несучі конструкції щодо динамічної стійкості, за збереження їхньої несучої здатності. Для цього потрібно визначити навантаження, що виникають у разі вибуху горючих сумішей усередині приміщень.

Визначення величини й характеру навантажень, що діють на огорожувальні конструкції під час вибухового горіння газоповітряних сумішей усередині об'ємів з отвором, запропоновано в працях [93–97].

Математична модель, що описує динаміку згоряння газоповітряних сумішей (ГПС) в об'ємі з урахуванням витікання, ґрунтована на кількох положеннях, сформульованих нижче.

1. Після запалення вибухонебезпечної суміші полум'я поширюється у вигляді сфери. Усі крапки поверхні фронту полум'я в будь-який момент перебувають на однаковій відстані від джерела запалювання, тобто не зважають на вплив потоку газу, що впливає з отвору або з кількох отворів на форму полум'я. Наявна взаємодія полум'я зі стінками замкненого об'єму, а також вплив форми об'єму на поширення полум'я.

Сферичне полум'я виникає за умови мимовільного поширення в необмеженому незворушному середовищі. Практично такий вид поширення полум'я простежуваний тільки в початковий момент, під час запалювання горючої суміші в замкнених об'ємах будь-якої форми. У сферичних посудинах поширення полум'я в разі запалювання в центрі зберігає сферичну форму до кінця процесу [98]. Подібне поширення фронту полум'я наявне в об'ємах, у яких відношення довжини до найменшого розміру поперечного перерізу (ширини або висоти) близьке до одиниці.

Припущення про сферичну симетрію фронту полум'я є звичайним для приміщень, розміри яких відрізняються несуттєво [99]. Це наближення обмежене початковими стадіями горіння, його точність вища, якщо менший надлишковий тиск.

Приміщення, у яких розташовані вибухонебезпечні виробництва, мають форму, близьку до прямокутної, де відношення довжини до ширини відповідає певному значенню. Проведені експерименти засвідчують, що сферична форма фронту полум'я може бути обмежена об'ємами прямокутної форми з такими геометричними розмірами сторін, коли менша зі сторін рівна або не більша від  $1/3$

найбільшого геометричного розміру приміщення. Тоді з достатньою точністю стверджують, що площу фронту полум'я варто визначати за формулою:

$$S_f = 5V_{\Pi}^{2/3}, \quad (2.1)$$

де  $V_{\Pi}$  – об'єм приміщення.

2. До моменту розкриття отвору в зовнішньому огороженні тиск усередині приміщення підвищується, як у замкненому об'ємі. Після розкриття отвору поряд із процесом горіння ГПС усередині об'єму визначають тиск та зважають на витікання газу через утворені прорізи. Процес витікання газу – адіабатичний.

3. Оскільки вибухове горіння – процес, за якого швидкість поширення полум'я менша від швидкості звуку в горючому середовищі, то процес зміни тиску на огорожувальні конструкції буде квазістатичним, а тиск однаковим у всіх точках приміщення.

Припущення про незалежність тиску в приміщенні від просторових координат усталене [100, 101] і справедливе за умови  $U_{\Pi}^e/30 < 1$ , тобто швидкість полум'я менша від швидкості звуку, а також коли  $a/30 < b/U_{\Pi}^e$  ( $a$  – більший розмір приміщення,  $b$  – менший).

4. З огляду на ці передумови, а також на експериментальні результати [101, 102], аналізують згоряння газу як у сферичному, так і в іншому об'ємі, із наявним отвору, що розкривається. Розрахунки проводять для двох випадків. У першому випадку, коли через отвір у середовище з постійним тиском  $P_0$  надходить горюча суміш, а потім продукти горіння, у другому разі, коли простежуваний процес горіння з урахуванням одночасного витікання продуктів згоряння й горючої суміші.

5. У працях [103–106] доведено, що вирази, які визначають динаміку згоряння газу в замкненому об'ємі, можуть бути розглянуті за вхідними термодинамічними параметрами: коефіцієнт розширення продуктів згоряння, теплоємності горючої суміші й продуктів згоряння. Найважливішими параметрами, що відображають динаміку згоряння, є коефіцієнт розширення й



швидкість полум'я. Відношення теплоємностей  $c_u/c_b$  виявляє порівняно слабкий вплив на час згорання, але суттєво впливає на швидкість наростання тиску. Для початкової стадії горіння під час одержання математичної моделі, що описує динаміку згорання газу в постійному об'ємі з отвором, без істотної втрати точності можна допустити рівність  $\gamma_u = \gamma_b$ , що дає змогу спростити залежності, які описують динаміку згорання ГПС.

6. Зміна тиску в об'ємі під час згорання газу є функцією частки згорілої суміші й швидкості вигорання, рівної добутку нормальної швидкості поширення полум'я по горючому середовищу на площу її поверхні. На першому етапі реалізації завдання допускають, що фронт полум'я після його деформування зберігає сферичну форму, а фактор турбулізації залишається постійним протягом вибуху після початку деформування фронту полум'я.

7. Збільшення швидкості поширення полум'я в процесі переміщення його всередині приміщення або в момент розгерметизації прорізу вираховують за допомогою введення коефіцієнта інтенсифікації (турбулізації) горіння.

Дослідження інтенсифікації процесу вибухового горіння ГПС засвідчують, що на зміну швидкості переміщення фронту полум'я, крім властивого явища нестійкості, впливатимуть також перешкоди на шляху його поширення й примусового повітрообміну, за якого швидкість поширення фронту полум'я збільшується, порівняно з умовами нормального горіння.

Дії вибухової хвилі, генеровані детонацією заряду ВР, розміщеного всередині певного об'єкта або камери, на стінки цього об'єкта розподілена за двома стадіями. Перша стадія пов'язана з навантаженням стінок у разі першого падіння на них вибухової хвилі. На цій стадії стінки камери відчують дію первісної відбитої хвилі малої тривалості, а на другій стадії – дію кількох послідовних імпульсів тиску. Амплітуда наступних імпульсів тиску знижується з часом, унаслідок незворотних термодинамічних процесів. Їхня форма може бути дуже складною через багаторазове відбиття вибухових хвиль як у герметичних, так і в негерметичних камерах із розвантажувальними отворами, через які витікають продукти вибуху або горіння. Максимальну величину початкового навантаження

на стінки камери або стіни приміщення за внутрішнього вибуху оцінюють за допомогою законів подібності або формул для нормального відбиття вибухової хвилі від твердої стінки.

Однак після першого відбиття внутрішньої вибухової хвилі від стін приміщення розподіл тиску стає складним. На рис. 2.1 [107] проілюстровано миттєвий розподіл тиску під час вибуху всередині негерметичної циліндричної камери, коли частина поверхні верхнього перекриття, нижньої основи та бічних циліндричних стінок зазнає дії відбитої хвилі, причому реалізується косо падіння для всіх поверхонь.

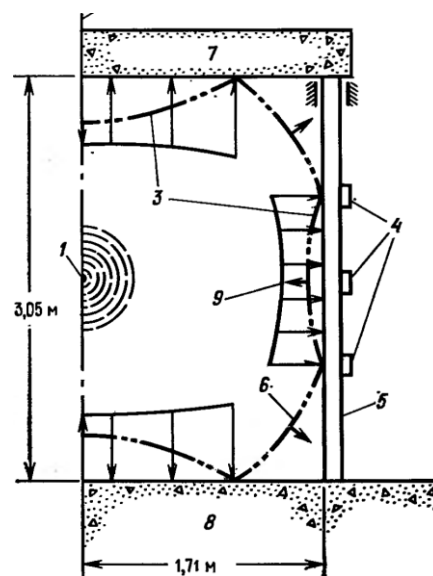


Рис. 2.1. Схема процесу відбиття вибухових хвиль від внутрішніх стінок циліндричної камери: 1 – заряд вибухової речовини; 2 – вісь симетрії; 3 – відбита вибухова хвиля; 4 – сталеві обручі перерізом  $5,7 \times 12,7$  см; 5 – двотаврова балка; 6 – вибухова хвиля, що падає; 7 – верхнє бетонне перекриття; 8 – нижня бетонна основа камер.

У разі косоного відбиття вибухової хвилі утворюються хвилі Маху, якщо кут падіння великий. Локальний тиск помітно зростає в місцях поєднання бічних стінок камери з нижньою підставою й верхнім перекриттям, у випадку відбиття вибухової хвилі від верхнього перекриття та нижньої підстави поблизу осі симетрії циліндричної камери. У камерах прямокутного перетину процес відбиття може бути ще більш складним.

Після першого відбиття хвилі поширюються від стінок до центру камери й «зустрічаються» у центральній внутрішній частині камери. Зазвичай, їхня амплітуда зростає, що призводить до утворення вторинної вибухової хвилі, яка знову падає на стінки камери. Як зазначено вище, надлишкова амплітуда «вторинної» хвилі виявляється трохи меншою від тієї, що падає. Після кількох циклів відбиття вибухових хвиль від стінок і геометричного центру камери дія внутрішнього надлишкового тиску на стінки камери припиняється.

Навантаження на стінки камери вимірюють за допомогою звичайних методів або розраховують у випадку камер достатньої симетричної конфігурації. Вибухове навантаження на стінки камери порівняно легко розрахувати для камер сферичної форми як за центрального, так і за нецентрального розташування вибухового джерела в камері [108, 109]. У камерах циліндричної форми вибухове навантаження, що діє під час вибуху джерела, розташованого на осі камери, можна розрахувати (хоч це пов'язане із суттєвими труднощами) за допомогою двовимірних чисельних алгоритмів (див., наприклад, рис. 2.1) [107]. Для будь-яких більш складних конфігурацій (наприклад, у разі розташування вибухового джерела не на осі циліндричної камери, вибухів у камерах прямокутного перетину або за наявності всередині камери яких-небудь перешкод, а також у випадку об'єктів більш складної форми) вибухове навантаження вже не можна розрахувати за допомогою ЕОМ, для визначення необхідне проведення експериментів. Численну кількість експериментальних даних про вибухові навантаження, що діють під час вибухів усередині камер (приміщень) кубічної й циліндричної форми за рівномірного розподілу розвантажувальних отворів по поверхні камери, схарактеризовано в роботі Кінгері й ін. [110].

Динаміка навантаження стінок приміщень у разі внутрішніх вибухів у камерах реальної геометрії дуже складна, проте за допомогою законів подібності для відбитих вибухових хвиль часто вдається одержати прості характеристики величини вибухового навантаження під час внутрішніх вибухів.

Перше припущення, яке спрощує аналіз, полягає в тому, що падаюча й відбита хвилі мають трикутні профілі [39], тобто

$$p_s(i) = \begin{cases} P_s(1 - t/T_s), & 0 \leq t \leq T_s; \\ 0, & t > T_s. \end{cases} \quad (2.2)$$

Однак тривалості цих ефективних хвиль задані незбіжними з реальним часом діями вибухової хвилі. Замість цього їм приписують такі значення, щоб зберегти правильне значення імпульсу вибухової хвилі. Саме в цьому полягає друге припущення.

Третє спрощення засноване на тому, що параметри внутрішнього вибухового навантаження на стіни приміщення здебільшого визначають із використанням параметрів нормальної (прямої) відбитої хвилі, навіть за косого відбиття хвиль від стінок камери (за умови, що як відстань  $R$  від центру вибухового джерела до крапки на внутрішній поверхні камери взята реальна відстань між цими крапками). Для сильних ударних хвиль таке припущення практично точно виконуване аж до значень кута падіння, близьких до граничного кута регулярного відбиття, який для повітря становить  $39^\circ$ . Для слабких ударних хвиль припущення застосовне аж до кута падіння  $70^\circ$  (рис. 2.2) [39]. У камерах прямокутного перерізу з відношенням довжини до ширини й висоти до ширини, близькими до одиниці, відбиття вибухових хвиль від внутрішніх стін практично скрізь буде регулярним.

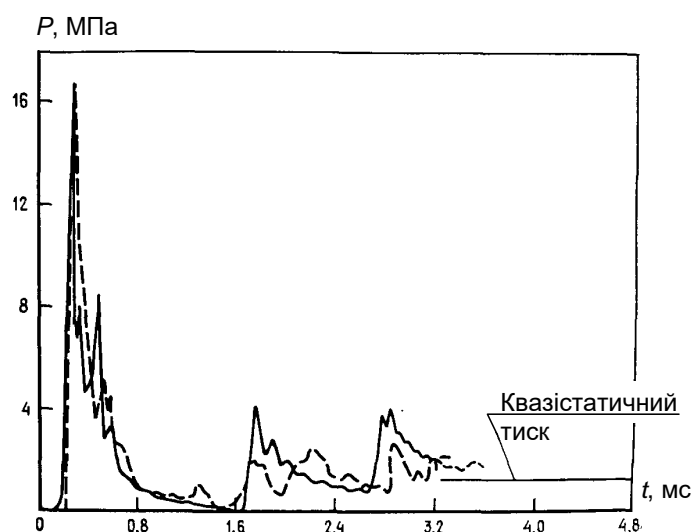


Рис. 2.2. Зіставлення розрахункового (суцільна штрихова лінія) тиску на бокову стінку та виміряного в циліндричній камері.

У герметичних об'ємах типу вибухових камер вибухова хвиля може кілька раз відбиватися від стінок і геометричного центру камери. У певних ситуаціях і над обмеженою частиною внутрішньої поверхні стінок камери відбиті хвилі можуть «зустрічатися» і підсилюватися. Однак їхня амплітуда встигає суттєво знизитися до чергового зіткнення зі стінкою або підставою камери. Для одержання наближеної оцінки амплітуд «вторинних» вибухових хвиль допускають, що друга відбита від стінки хвиля має вдвічі менші амплітуду й імпульс, ніж перша відбита хвиля. Третя хвиля також має вдвічі менші амплітуду й імпульс, ніж друга відбита хвиля, і внеском усіх інших циклів відбиття можна зневажити.

Математично це має такий вигляд: час дії другої та третьої відбитих хвиль вважають рівними з часом дії першої відбитої від стін камери хвилі. Останнє припущення визначає час пробігу хвилі, а саме час між моментами послідовного відбиття вибухових хвиль від стін камери [39]:

$$t_r = 2t_a. \quad (2.3)$$

Це припущення не є точним, оскільки друга й третя відбиті хвилі слабші від першої, тому швидкість їх поширення нижча від швидкості першої хвилі. Проте рівняння (2.3) містить погрішність того самого порядку величини, що й інші припущення, які спрощують [39].

Зміну з часом навантаження в деякій крапці внутрішньої поверхні камери, розраховану на основі поданих припущень, що спрощують, схематично зображено на рис. 2.3.

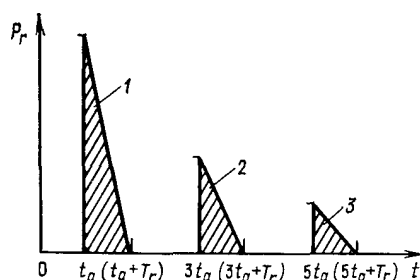


Рис. 2.3. Спрощена схема стрибків тиску, що діє на стінки камери в разі внутрішнього вибуху: 1 – перший стрибок; 2 – другий стрибок; 3 – третій стрибок.

Найчастіше два останні стрибки тиску не беруть до уваги, оскільки максимальний тиск у них і їхні імпульси суттєво менші, ніж у першій хвилі. З урахуванням використаних вище припущень, сумарне навантаження на стіни приміщення в 1,75 раза перевершує навантаження від першого імпульсу тиску [39]. Для приміщень із характерним часом відгуку, що суттєво перевищують тривалість третього імпульсу тиску на рис. 2.3, використовують спрощення, об'єднуючи всі три імпульси тиску в один і множачи амплітуду й імпульс хвилі на множник 1,75 [39].

## 2.2. Технічний опис легкоскидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів

В основі конструкції досліджуваних систем ЛСК використовують звичайний профіль скління приміщень одного з виробників, де замість склопакетів наявні звичайні стільникові полікарбонатні листи [129]. У цьому випадку застосовують стільникові полікарбонатні листи, встановлені в рамах зі стандартного ПВХ профілю. На рис. 2.4 зображено зовнішній вигляд рами зі звичайного віконного профілю із встановленим у нього стільниковим полікарбонатним листом [129].



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд елемента скління досліджуваної системи легкоскидних конструкцій

Стільникові полікарбонатні листи виготовляють із якісних полікарбонатних гранул, через їх термоекструзію. На рис. 2.5 подано схему розташування комірок у стільникових полікарбонатних листах досліджуваних систем ЛСК.

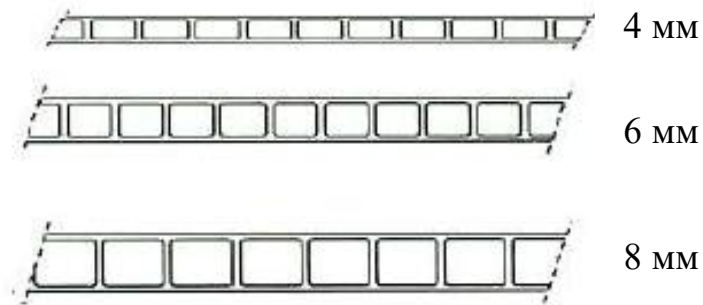


Рис. 2.5. Структура полікарбонатних стільникових листів для створення систем легкоскридних конструкцій

Полікарбонатний лист у розрізі представлено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд та внутрішня структура полікарбонатного стільникового листа

Для створення систем ЛСК відповідно до [129] запропоновано застосовувати полікарбонатні листи різної товщини: 4 мм, 6 мм та 8 мм, як продемонстровано на рис. 2.5.

Полікарбонатні листи закріплюють у рамах, у спеціальний вузол кріплення. У вузлі кріплення полікарбонатний лист фіксують за допомогою сили тертя. На рис. 2.7 зображено конструкцію закріплювального вузла [129].

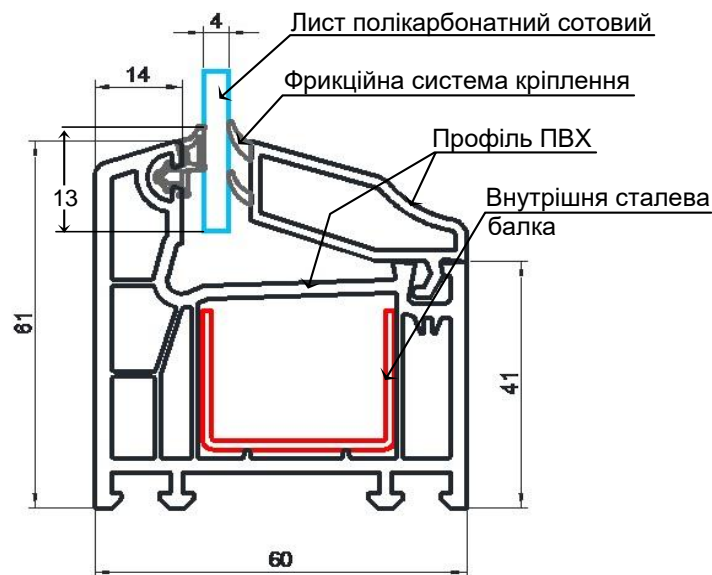


Рис. 2.7. Конструктивна схема вузла кріплення полікарбонатних стільникових листів у рамі віконного профілю

Система закріплення стільникових полікарбонатних листів у рамах віконного профілю гнучка, що вможливує поворот кінців листа, закріпленого в рамі. Під час прогину листа його кінець починає рухатися, після докладання певного зусилля виходить із вузла кріплення. Проріз рами звільняється й утворюється вільна площа, через яку відбувається витік газу. Надлишковий тиск швидко зменшується до нуля. У такий спосіб можна використовувати конструктивну систему як елемент ЛСК відповідно до [129]. Конструктивні розміри прорізу з полікарбонатним листом засвідчують, за якого надлишкового тиску відбувається вивільнення прорізу, тобто спрацювання його як елемента ЛСК. Система, що складається з необхідної кількості таких прорізів, є системою ЛСК.

Добір конструктивних параметрів складників прорізів системи ЛСК цієї конструкції становить основу методики її розрахунку. Такий розрахунок можливий за умови наявних довідникових даних щодо механічних властивостей



матеріалу листів, а також відомостей стосовно сил, які діють у закріплювальних вузлах. Нині цієї інформації не існує, тому її визначення – одне із завдань створення методики.

### **2.3. Математична модель поведінки стільникових полікарбонатних листів в умовах навантаження під час вибуху досліджуваних систем легкоскридних конструкцій**

У ході аналізу силової взаємодії в елементі ЛСК, що складається зі стільникового полікарбонатного листа (СПЛ) [129] і віконного профілю, де він має бути закріплений, сформульовано основні припущення й гіпотези щодо системи.

1. За силової дії на елементи ЛСК на основі СПЛ у віконному профілі конструкції відбуваються тільки пружні деформації.

2. Матеріал СПЛ є однорідним та ізотропним, що описують за ефективними механічними характеристиками.

3. Сила тертя між ущільнювачами закріплювального вузла й поверхнею СПЛ є постійною та незалежною від швидкості руху поверхні СПЛ і їх деформації.

4. У процесі аналізу силової взаємодії власну вагу СПЛ не враховують.

5. У ході аналізу напружено-деформованого стану всі навантаження вважають статичними, тобто інерційні характеристики матеріалу не враховують.

6. Поперечні деформації СПЛ набагато менші за їхні габаритні розміри й не позначаються на результатах визначення даних деформацій в умовах силового впливу надлишкового тиску вибуху.

7. Під час деформування СПЛ зважають на те, я що він може зазнавати тільки чистого згину, без додаткових поздовжніх деформацій розтягу або стискання.

8. Критерієм спрацювання елемента ЛСК слугує досягнення критичних переміщень кінців СПЛ у напрямку найменшого розміру прорізу.

### 2.3.1. Розрахункові схеми

Для аналізу силової взаємодії в елементі ЛСК, що складається зі стільникового полікарбонатного листа (СПЛ) відповідно до [124, 125, 129] та віконного профілю, де він має бути закріплений, складено розрахункову схему, подану на рис. 2.8.

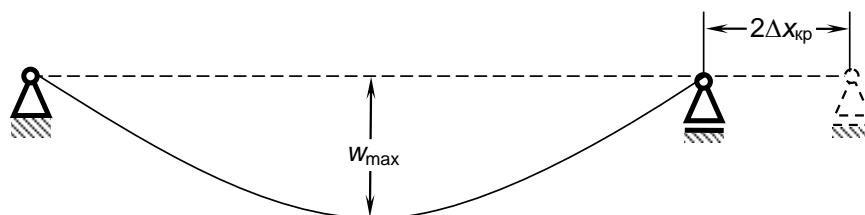


Рис. 2.8. Розрахункова схема деформування стільникового полікарбонатного листа в рамі з віконного профілю до визначення критичного переміщення його кінця

СПЛ, закріплений у рамах із віконного профілю, – прямокутна пластина, що закріплена шарнірно з можливістю вільного переміщення кінців СПЛ у поздовжньому напрямку, навантажена рівномірно розподіленим навантаженням. На рис. 2.9 зображено розрахункову прикладення навантаження СПЛ.

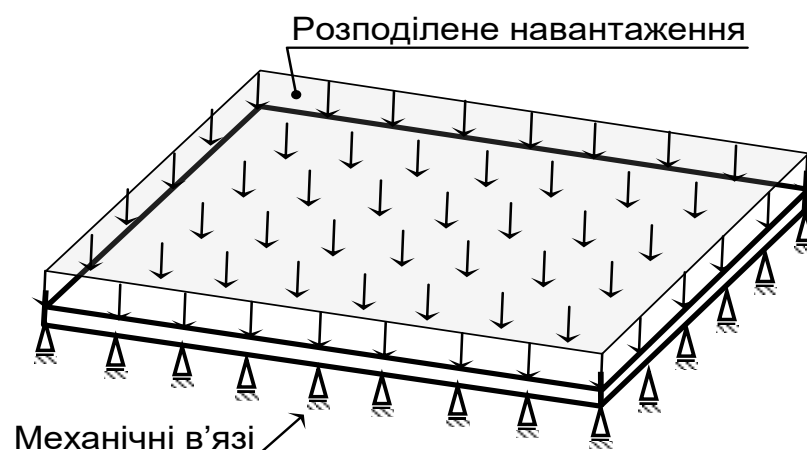


Рис. 2.9. Розрахункова схема для визначення силової взаємодії в стільниковому полікарбонатному листі, закріпленому в рамі з віконного профілю в умовах дії надлишкового тиску вибуху

Аналіз деформаційного відклику механічної системи, якою є СПЛ, закріплений у рамі з віконного профілю, вимагає врахування сили тертя, що утримує кінці СПЛ у закріплювальних вузлах. Для цього має бути застосована розрахункова схема, представлена на рис. 2.10.

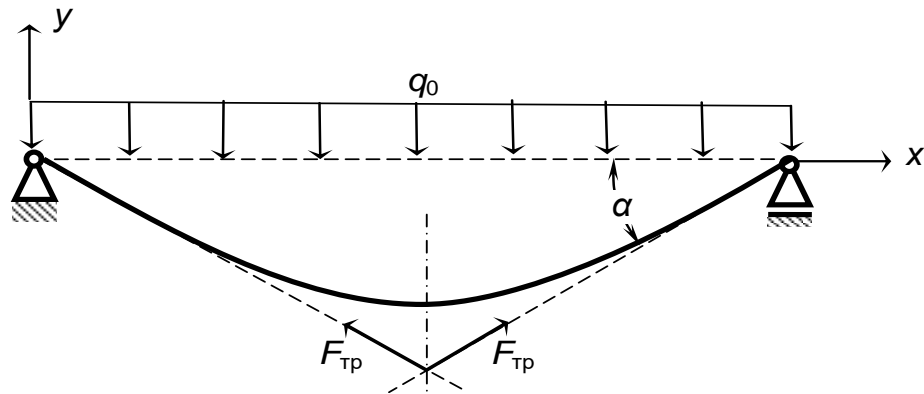


Рис. 2.10. Розрахункова схема силової взаємодії в стільниковому полікарбонатному листі в рамі віконного профілю в умовах дії надлишкового тиску вибуху (за врахування сил тертя у вузлах закріплення)

Розрахункові схеми варто використовувати для побудови математичної моделі, що дає змогу отримати геометричні розміри рами для їх використання в системах ЛСК.

### 2.3.2. Математична модель для визначення конструктивних параметрів рам для систем легкоскридних конструкцій

Унаслідок використання розрахункових схем елементів систем ЛСК, складено рівняння статичної рівноваги, що має такий вигляд:

$$\sum Y_i = q_0 \cdot a \cdot b - 2(F_{mp}^x \sin \alpha + F_{mp}^z \sin \beta) - Q_y = 0, \quad (2.4)$$

де  $q_0$  – надлишковий тиск вибуху, Па;

$a$  – найменший габаритний розмір прорізу рами, м;

$b$  – найбільший габаритний розмір прорізу рами, м;

$F_{mp}^x, F_{mp}^z$  – сили тертя, що утримують кінці СПЛ у вузлі кріплення вздовж осі  $x$  та осі  $z$ , Н;

$\alpha, \beta$  – кути нахилу дотичних до пружної лінії згину СПЛ із найбільшої та найменшої сторін прорізу рами елемента системи ЛСК, рад;

$Q_y$  – поперечна сила в точці на перетині діагоналей прорізу рами секції системи ЛСК, Н.

Синуси кутів нахилу дотичних до пружної лінії згину СПЛ із найбільшої та найменшої сторін прорізу рами елемента системи ЛСК визначають за виразами:

$$\sin \alpha = \frac{\pi w_{\max}}{\sqrt{a^2 + \pi^2 w_{\max}^2}}, \quad \sin \beta = \frac{\pi w_{\max}}{\sqrt{b^2 + \pi^2 w_{\max}^2}}. \quad (2.5)$$

Поперечна сила  $Q_y$  може бути визначена за формулою згідно з теорією пластинок та оболонок С. Тимошенка [115, 124, 125, 127]:

$$Q_y = \frac{w_{\max} \pi^6 D \cdot a \cdot b}{16} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{(2m+1)+(2n+1)-1}{2}}}{(2m+1)(2n+1) \left( \frac{(2m+1)^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{b^2} \right)^2} \right]^{-1}, \quad (2.6)$$

де  $D$  – ефективний параметр жорсткості СПЛ, Н·м

$m = 1, 3, 5, 7, \dots; n = 1, 3, 5, 7, \dots$  – непарні цілі числа.

Ефективний параметр жорсткості СПЛ визначають за формулою:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (2.7)$$

Тут  $E$  – модуль пружності I роду, Па;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$h$  – товщина СПЛ, м.

Сили тертя визначають за таким виразом:

$$F_{mp}^x = q_{mp} \cdot b; F_{mp}^z = q_{mp} \cdot a, \quad (2.8)$$

де  $q_{mp}$  – розподілені сили тертя по довжині вузла кріплення в рамі елемента ЛСК, Н/м.

На підставі записаних виразів (2.5) – (2.8), рівняння рівноваги (2.4) набуває вигляду:

$$q_0 \cdot a \cdot b - \frac{w_{max} \pi^6 D \cdot a \cdot b}{16} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{(2m+1)+(2n+1)}{2}-1}}{(2m+1)(2n+1) \left( \frac{(2m+1)^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{b^2} \right)^2} \right]^{-1} - 2q_{mp} \left( \frac{b \pi w_{max}}{\sqrt{a^2 + \pi^2 w_{max}^2}} + \frac{a \pi w_{max}}{\sqrt{b^2 + \pi^2 w_{max}^2}} \right) = 0. \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) застосовують для знаходження мінімальних конструктивних параметрів  $a$  та  $b$  прорізів рами з віконного профілю як конструктивних складників систем ЛСК для певного значення надлишкового тиску вибуху. Це використовують за умови відомого ефективного параметра жорсткості  $D$  та сили тертя ущільнювачів по поверхні СПЛ  $F_{mp}$ . Такі параметри визначають унаслідок проведення експериментальних досліджень.

На особливу увагу заслуговує визначення максимального прогину СПЛ  $w_{max}$ . Цей параметр пов'язаний із критичним переміщенням країв СПЛ у поздовжньому напрямку вбік найменшого габаритного розміру прорізу рами елемента ЛСК (див. рис. 2.8). З огляду на припущення, що згин СПЛ є чистим, можна записати рівняння, яке пов'язує найбільший прогин СПЛ та переміщення його країв убік найменшого габаритного розміру прорізу рами елемента ЛСК.

Для запису рівняння функцію, що описує прогин у кожній точці СПЛ, визначають за виразом, запропонованим у праці [115]:

$$w(x, y) = \frac{16q_0}{\pi^6 D} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(m\pi x) \cdot \sin(n\pi y)}{mn \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \right]. \quad (2.10)$$

Якщо допустити, що вихід країв СПЛ відбувається в напрямку найменшого розміру прорізу, координата  $y$  буде дорівнювати  $y = b/2$ . Згідно з працею [115], ряд у виразі (2.10) швидко збігається й можна обмежитися одним його членом за  $m = n = 1$ .

Максимальний прогин СПЛ визначають за формулою:

$$w_{max} = \frac{16q_0}{\pi^6 D} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \right]. \quad (2.11)$$

Записуючи вираз (2.11) через максимальний прогин СПЛ за (2.10), фіксують вираз для функції прогинів у напрямку найменшого розміру прорізу:

$$w(x) = w_{max} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right). \quad (2.12)$$

Після корегування рівняння (2.12) з огляду на схему, подану на рис. 2.8, і визначення довжини дуги, що описує деформований стан СПЛ у напрямку найменшого розміру прорізу, рівняння для визначення критичного переміщення краю СПЛ набуває такого вигляду:

$$a - \int_0^{a-2\Delta x_{кр}} \sqrt{1 + \frac{w_{\max} \pi}{(a-2\Delta x_{кр})} \cos^2 \left( \frac{\pi x}{(a-2\Delta x_{кр})} \right)} dx = 0. \quad (2.13)$$

Рівняння записане з використанням відомого виразу для визначення довжини дуги [11]. Інтеграл у рівнянні (2.6) не має аналітичного виразу та поданий як еліптичний інтеграл Лежандра II роду, що може бути визначений тільки табличним способом [116]. Більш ефективним способом розв'язку рівняння (2.13) є спосіб, заснований на застосуванні формули Сімпсона для наближеного обчислення визначених інтегралів [11]. У разі використання формули Сімпсона рівняння (2.14) набуває вигляду:

$$a - \frac{a-2\Delta x_{кр}}{6} \left( 2 \sqrt{1 + \frac{w_{\max} \pi}{a-2\Delta x_{кр}}} + 4 \right) = 0. \quad (2.14)$$

Унаслідок нескладних алгебраїчних перетворень, записаний вираз для наближеного визначення максимального прогину СПЛ за умов досягнення критичного переміщення його кінця у вузлі кріплення рами з віконного профілю, що має такий вигляд [124, 125, 128]:

$$\Delta x_{кр} = 0.25 \sqrt{36a^2 + 16a\pi w_{\max} + \pi^2 w_{\max}^2} - 1.5a - 0.25\pi w_{\max}, \quad (2.15)$$

де  $\Delta x_{кр}$  – критичне переміщення країв СПЛ у поздовжньому напрямку вбік найменшого габаритного розміру прорізу рами елемента ЛСК (див. рис. 2.7 та рис. 2.8).

Отже, розроблений математичний апарат дає змогу визначати конструктивні параметри елементів систем ЛСК за допомогою чисельного розв'язку нелінійного трансцендентного рівняння (2.9) із використанням виразу (2.15).

## 2.4. Математична модель для розрахунків динамічного впливу в легкоскридних конструкціях за умов динамічного впливу вибуху

### 2.4.1. Базова математична модель явного методу розрахунків динамічного впливу в системах

У постановці для окремого елемента твердого деформованого тіла в початковому стані в початковий час  $t = 0$ , як зображено на рис. 2.11. Окремий елемент тіла позначений  $\Omega_0$  і границею  $\Gamma_0$ . Поточна конфігурація тіла в певний час  $t$  позначена  $\Omega$ , а границя  $\Gamma$ . Коли тіло рухається від положення  $\Omega_0$  до положення  $\Omega$ , довільна точка  $X$ , у початковому стані належна до області  $\Omega_0$ , буде належати до області  $\Omega$ .

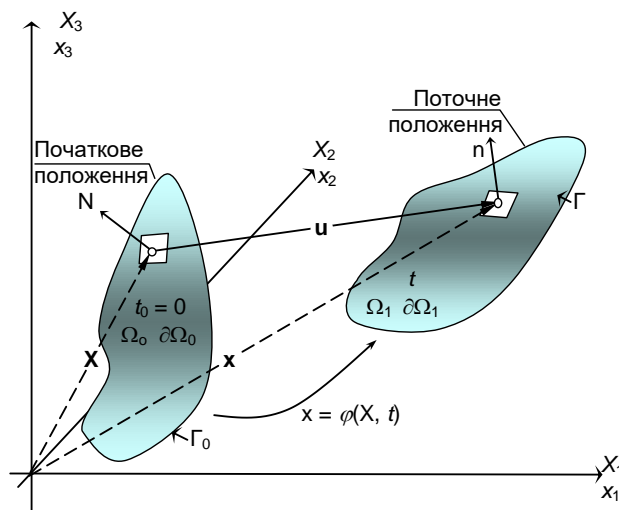


Рис. 2.11. Початковий недеформований стан та поточний недеформований стан твердого тіла

Фундаментальні рівняння, що описують динамічну взаємодію твердих тіл, отримані внаслідок урахування законів замикання або балансу, відповідно до праць Belytschko, Flangan та ін. [117–121, 126].

У цій постановці має бути записане рівняння збереження імпульсу у вигляді:



$$\sigma_{ij,i} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{x}_i, \quad (2.16)$$

де  $\sigma_{ij,i}$  – тензор напружень Коши;

$\rho$  – густина матеріалу;

$\rho \cdot f_i$  – сили, що діють на тіло;

$\ddot{x}_i$  – пришвидшення точки тіла.

Закон збереження маси записують у вигляді:

$$\rho \cdot \det(\mathbf{J}) = \rho_0, \quad (2.17)$$

де  $\rho_0$  – початкова густина матеріалу;

$\det(\mathbf{J})$  – визначник дотичної матриці жорсткості (Якобіан).

Рівняння для закону збереження енергії охоплює суму кінетичної та внутрішньої енергій, що має дорівнювати сумі робіт зовнішніх сил.

$$P^{int} + P^{kin} = P^{ext} + P^{heat}. \quad (2.18)$$

Кінетична енергія визначена як:

$$P^{kin} = 0.5 \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} d\Omega. \quad (2.19)$$

Величина внутрішньої енергії визначена з виразу:

$$P^{ext} = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma. \quad (2.20)$$

За відсутності джерел теплового нагрівання, згідно з працями [117–120, 126], рівняння збереження енергії може бути записане так:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho w^{int} + (0.5 \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma. \quad (2.21)$$

Перетворене рівняння збереження енергії для деформованого твердого тіла записане у вигляді:

$$\rho \frac{d}{dt} w^{int} = \sigma_{ij} D_{ij}, \quad (2.22)$$

де  $D_{i,j}$  – величина швидкості наростання деформацій, що визначають за виразом:

$$\rho \dot{w}^{int} = 0.5 \sigma_{ij} \left[ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right].$$

На границі тіла  $\Gamma_f$  рухомі граничні умови описані рівнянням:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t). \quad (2.23)$$

де  $n_j$  – зовнішньоспрямована нормаль до границі твердого тіла.

Для граничних умов, що описують деформацію на границі твердого тіла, застосовуване рівняння

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(t). \quad (2.24)$$

Якщо контакт між тілами припиняється, утворені граничні умови варто записати через рівняння:

$$\left(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-\right) n_j = 0. \quad (2.25)$$

За умови надання тілу можливих переміщень  $\delta x_i$  стан твердого деформованого тіла описують рівнянням, що виражає баланс можливих робіт:

$$\int_{\Omega} \left[ \rho \ddot{x}_i + \sigma_{ij,j} - \rho f_i \right] \delta x_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} \left[ \sigma_{ij} n_j - t_i \right] \delta x_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \left( \sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^- \right) n_j \delta x_i d\Gamma = 0. \quad (2.26)$$

Прирівнюючи суму можливих робіт до нуля з проведенням необхідних перетворень, рівняння (2.23) записують у вигляді [117–120, 126]:

$$\int_{\Omega} \rho \ddot{x}_i \delta x_i d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} \delta x_i d\Omega - \int_{\Omega} \rho f_i \delta x_i d\Omega - \int_{\Gamma_f} t_i \delta x_i d\Gamma - \int_{\Gamma_c} t_i^c \delta x_i d\Gamma = 0. \quad (2.27)$$

#### 2.4.2. Кінцево-елементна апроксимація базових рівнянь динамічної взаємодії

Рівняння для інтерполяції розподілу параметрів у внутрішньому просторі кінцевого елемента (КЕ) записують у вигляді

$$x_i(\mathbf{X}, t) = \bar{x}_i(\mathbf{X}(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^m \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t), \quad (2.28)$$

де  $\phi_j$  – функція форми параметричних координат  $(\xi, \eta, \zeta)$ ;

$m$  – кількість вузлових точок, що визначають простір КЕ;

$x_i^j$  – координата вузлової точки за однією з трьох осей координат.

Потенціальна енергія для КЕ має вигляд такого рівняння

$$\delta\Pi_e = \int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma, \quad (2.29)$$

де  $\Phi_i^e = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^e$ .

Для ансамблю КЕ повинен бути виконаний принцип можливих переміщень, що дає змогу записати рівняння збереження енергії для всього тіла, розділеного на КЕ:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[ \int_{\Omega_e} \rho \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma \right] = 0. \quad (2.30)$$

У матричному вигляді рівняння (2.30) набуває вигляду:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[ \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} \mathbf{a}_e d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega - \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma \right] = 0, \quad (2.31)$$

де  $\mathbf{N}$  – інтерполяційна матриця;

$\boldsymbol{\sigma}$  – вектор напружень;

$\mathbf{B}$  – матриця жорсткості;

$\mathbf{a}_e$  – вектор вузлових пришвидшень;

$\mathbf{b}$  – вектор навантажень;

$\mathbf{t}$  – вектор тягових сил.

### 2.4.3. Математична модель для опису контактної взаємодії

На рис. 2.12 подано схему контактної взаємодії двох тіл за їхнього контакту в екстремальних умовах удару або взаємного проникнення.

Передбачено, що два тіла контактують без присутності абсолютно твердих тіл, використовуваних у певних випадках для спрощення математичних моделей.

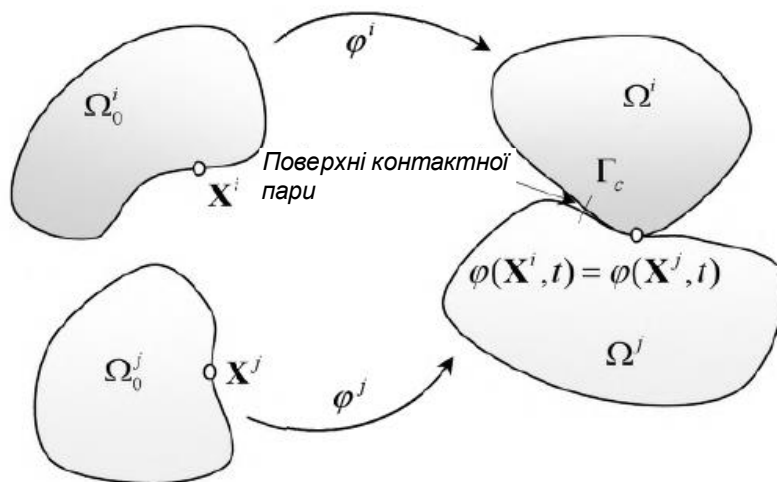


Рис. 2.12. Схема контактної взаємодії двох тіл

Для ідентифікації моменту, коли тіла розпочинають контактувати, необхідно дотримати умови Герца – Синьорині – Мора [117–120, 126]:

$$g \geq 0, \lambda \geq 0, g\lambda \geq 0, \quad (2.32)$$

де  $g$  – функція зазору, що визначають так:

$$g(\mathbf{x}^i, t) = (\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j)^T \mathbf{n}. \quad (2.33)$$

Схема визначення геометричних параметрів контакту представлена на рис. 2.13.

Для врахування сил тертя під час контактної взаємодії застосовують закон Кулона в узагальненій формі. Причому величину тангенціальної швидкості визначають так:

$$\dot{u}(\mathbf{x}^i, t) = (\dot{\mathbf{u}}^i - \dot{\mathbf{u}}^j)^T \mathbf{s}. \quad (2.34)$$

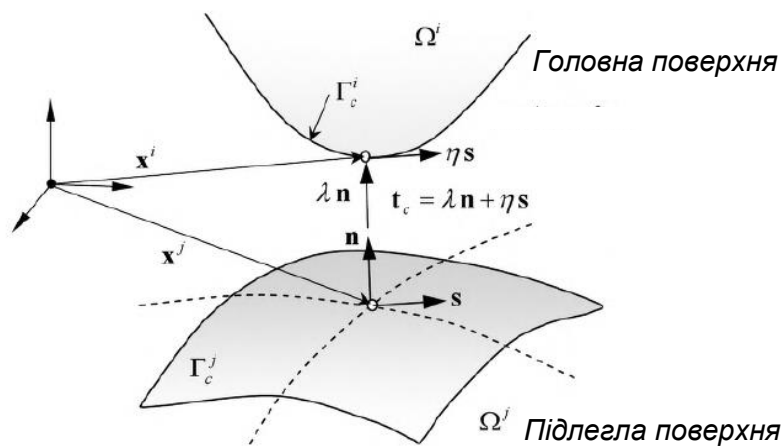


Рис. 2.13. Схема визначення геометричних параметрів контакту

Закон Кулона в узагальненій формі має вигляд:

$$\begin{cases} |\tau| \leq 1; \\ \text{якщо } |\tau| < 1 \text{ приймається } \dot{u} = 0; \\ \text{при } |\tau| < 1 \text{ приймається } \text{sign}(\dot{u}) = \text{sign}(\tau). \end{cases} \quad (2.35)$$

Параметр  $\tau$  визначають за формулою:

$$\tau = \frac{\eta}{\mu\lambda}, \quad (2.36)$$

де  $\mu$   $\lambda$  – статичний і динамічний коефіцієнти опору тертя.

Для моделювання контакту між поверхнями КЕ використовують метод штрафних функцій та метод множення Лагранжа [117–120, 126]. Для сегменту між чотирма вузлами застосовують методику, описану нижче.

1. Розглядають пару «підлеглий вузол – головний сегмент КЕ поверхні тіла» так, щоб проекція підлеглого вузла на сегмент опинилася в 1 або в четвертому квадранті локальної системи координат, що пов'язана з головним сегментом. Проекцію вузла на сегмент називають контактною точкою, а відстань між підлеглим вузлом і контактною точкою – проекційною відстанню. У ході

зіставлення вузла й сегменту площа сегменту трохи збільшується (на 2 %) для забезпечення надійної роботи контактної алгоритму.

2. Визначають координати контактної точки в локальній системі сегменту.

3. Обчислюють проекційну відстань у локальній системі координат, що пов'язана з головним сегментом.

4. Коли проекційна відстань є негативною, її абсолютне значення називають глибиною проникнення. За цією величиною визначають силу, що діє на підлеглий вузол за формулою [117–120]:

$$f_s = K_c \cdot \delta, \quad (2.37)$$

де  $f_s$  – контактна вузлова сила;

$K_c$  – контактна жорсткість;

$\delta$  – глибина проникнення.

5. Визначають сили у вузлах сегменту за функцією форми, що залежить від координат точки контакту в локальній системі координат головного сегмента. Вигляд функції форми подано нижче [117–120].

$$f_m^i = N_i(\xi, \eta) \cdot f_s \quad \text{де} \quad \begin{cases} N_1 = 0.25(1 + \xi)(1 + \eta); \\ N_2 = 0.25(1 + \xi)(1 - \eta); \\ N_3 = 0.25(1 - \xi)(1 + \eta); \\ N_4 = 0.25(1 - \xi)(1 - \eta). \end{cases} \quad (2.38)$$

Контактну жорсткість визначають за формулою:

$$K_c = \frac{f_s A^2 k}{V_e}, \quad (2.39)$$

де  $f_s$  – визначена як штрафний фактор;

$A$  – площа сегменту;

$k$  – об’ємний модуль;

$V_e$  – об’єм КЕ, до якого належить сегмент.

#### 2.4.4. Явний метод чисельної апроксимації рівнянь динаміки

Швидкості вузлів КЕ під час застосування явного метода інтегрування визначають за формулою [117–120, 126]:

$$\mathbf{v}^{n+0.5} = (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n) / \Delta t^{n+0.5} \Rightarrow \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t^{n+0.5} \mathbf{v}^{n+0.5}. \quad (2.40)$$

Зміщення вузлів КЕ визначають за таким виразом:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^{n+1}. \quad (2.41)$$

Основна формула для визначення прискорень вузлів КЕ як похідної за часом має такий вигляд:

$$\mathbf{a}^n = (\mathbf{v}^{n+0.5} - \mathbf{v}^{n-0.5}) / \Delta t^n \Rightarrow \mathbf{v}^{n+0.5} = \mathbf{v}^{n-0.5} + \Delta t^n \mathbf{a}^n. \quad (2.42)$$

Із використанням цих формул рівняння (2.20) записують у вигляді

$$\mathbf{M} \mathbf{a}^n = \mathbf{F}^n; \quad \mathbf{F}^n = \sum_{e=1}^{en} (\mathbf{F}_e^{ext} - \mathbf{F}_e^{int}). \quad (2.43)$$

Прискорення точок визначають за системою лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^n. \quad (2.44)$$



Критичний крок за часом визначають відповідно до критерію Куранта – Фридрихса – Леві за виразом:

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \min \frac{l_e}{c_e}, \quad (2.45)$$

де  $c_e$  – параметр, що визначають за формулою:

$$c_e = \sqrt{E_e / \rho_e}.$$

Тут  $l_e$  – характеристичний просторовий крок сітки.

## 2.5. Висновки до розділу

Для визначення параметрів напружено-деформованого стану розроблено математичну модель поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

Розроблена математична модель базована на теорії пластинок та оболонок С. Тимошенка. Математична модель поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху була доповнена рівнянням для визначення критичного переміщення краю стільникового полікарбонатного листа в замку стандартного віконного профілю.

Розроблена математична модель має бути доповнена значеннями ефективної гнучкості та критичного переміщення краю стільникового полікарбонатного листа в замку стандартного віконного профілю.

Обґрунтована математична модель для розрахунку розкриття легкоскідних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів за методом кінцевих елементів у комбінації з явним методом розрахунку.

**РОЗДІЛ 3**  
**ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ**  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**  
**ПОВЕДІНКИ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СТІЛЬНИКОВИХ ЛИСТІВ**  
**ПІД ВПЛИВОМ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ**

**3.1. Методика визначення ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів**

Для використання розробленого математичного апарату у вигляді рівняння (2.9) необхідно мати дані щодо ефективної жорсткості СПЛ у системі ЛСК відповідно до [129 – 131]. Необхідні відомості мають бути визначені за допомогою експериментальних досліджень. Для експериментальних досліджень розроблено методику, що заснована на основних принципах вимірювання вітрового навантаження на віконні системи, що регламентовані в стандартах ДСТУ Б В.2.6-89:2009 та ДСТУ Б В.2.6-15:2011, які чинні в Україні.

**3.1.1. Обладнання для дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів**

Під час випробувань СПЛ із конструкцією за [129] для отримання їхньої ефективної жорсткості застосовано накладання розподіленого навантаження на СПЛ, що закріплений у рамі, зі стандартного віконного профілю ПВХ найбільш уживаних розмірів при влаштуванні систем ЛСК. Прикладене навантаження має імітувати дію надлишкового тиску вибуху, як це запропоновано в праці [122, 130, 131]. За таких умов потрібно випробувати натурні зразки, розміри яких повинні відповідати розмірам реальних досліджуваних елементів систем ЛСК або наближатися до них. У цих умовах вимірюють силові та деформаційні параметри СПЛ, зафіксованих у рамах, аналогічно до того, як вони прикріплені в реальних секціях систем ЛСК (згідно з працею [129]) із гнучкими огорожувальними світлопрозорими панелями.

Для випробувань застосовано два типи експериментальних установок, що склалися із закріплювальної рами, навантажувального вузла та вимірювальної інфраструктури. Основні вимірювальні й випробувальні засоби для експериментальних досліджень подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

### Засоби вимірювальної та випробувальної техніки

Назва засобів вимірювальної техніки	Заводський номер	Дата перевірки		№ свідоцтва
		останньої	наступної	
Прогиномір 6ПАО	813	13.06.2016 р.	13.06.2021 р.	Ua/04/160613/230812
Рулетка за ДСТУ 4179, ціна поділки 1.0 мм	-	1 квартал 2016 р.	1 квартал 2021 р.	тавро
Лінійка металева за ДСТУ ГОСТ 427:2009 довжиною 1000 мм, ціна поділки 1 мм	-	1 квартал 2016 р.	1 квартал 2021 р.	тавро
Випробувальна машина Fm-1000		13.06.2016 р.	13.06.2021 р.	Ua/04/160664/230812
Динамометр	51341	22.06.16	22.06.21	39-02/0905

На рис 3.1 подано схеми проведення вимірювань у випробувальних установках обох типів.

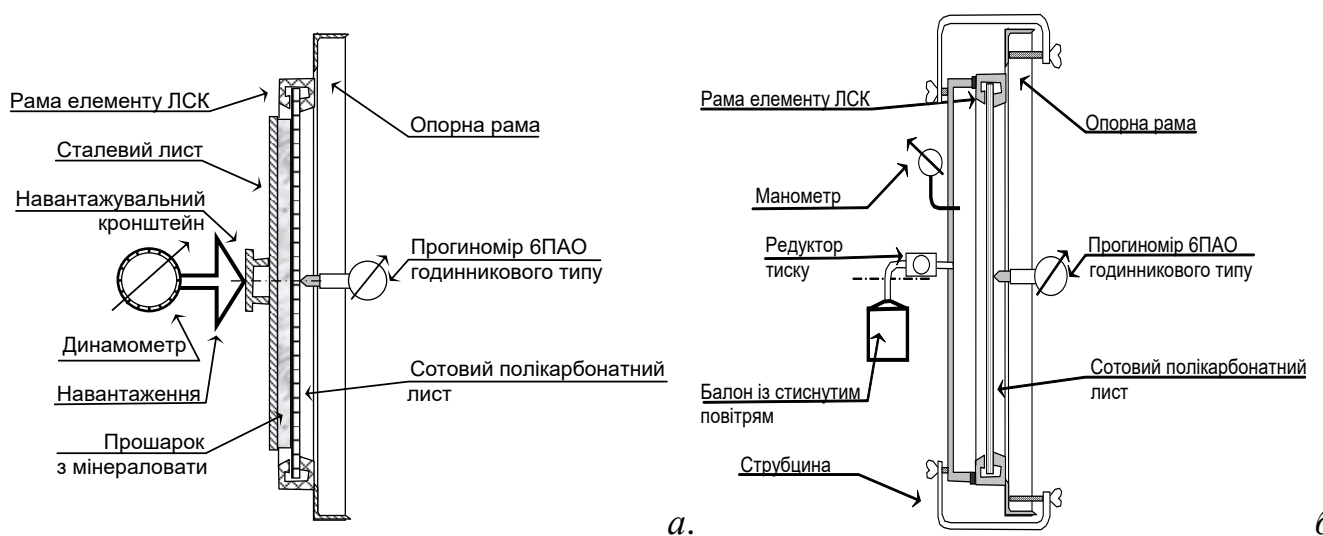


Рис. 3.1. Конструктивна схема установок I типу (а) та II типу (б) для випробувань стільникових полікарбонатних листів щодо впливу надлишкового тиску вибуху

### 3.1.2. Зразки для дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів

Як випробувальні зразки для отримання ефективної жорсткості СПЛ узяті зазначені СПЛ у рамах зі стандартного віконного профілю з розмірами, що відповідають розмірам реальних світлопрозорих гнучких елементів систем ЛСК або наближаються до них, відповідно до [129, 130, 131]. Для випробування виготовлено 3 зразки фрагментів секцій ЛСК у вигляді рам розмірами 1502×1008 мм, для цього використаний профіль WDS.

У виготовлених фрагментах секцій під час випробувань фіксували стільникові полікарбонатні листи завтовшки 4; 6; 8 мм із використанням ПВХ штапиків завтовшки 36 мм, як рекомендовано в праці [122].

Загальний вигляд зразків зі змонтованим полікарбонатним листом перед випробуванням зображено на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Загальний вигляд рами зі змонтованим стільниковим полікарбонатним листом перед випробуванням

Конструкція установок для випробування першого та другого типів передбачала прикладення рівномірного навантаження на СПЛ через сталеву пластину завтовшки 5 мм, через мінераловатну прокладку завтовшки 50 мм до поверхні СПЛ. Завдяки прокладці з мінераловати, досягали силової дії відповідно до розподіленого навантаження. В установці другого типу розподілене навантаження прикладене завдяки поданню повітря, що повністю відтворює тип механічного впливу [122, 128].

На рис. 3.3 представлена схема розташування сталевій пластини на СПЛ, що встановлена в раму з віконного профілю ПВХ.

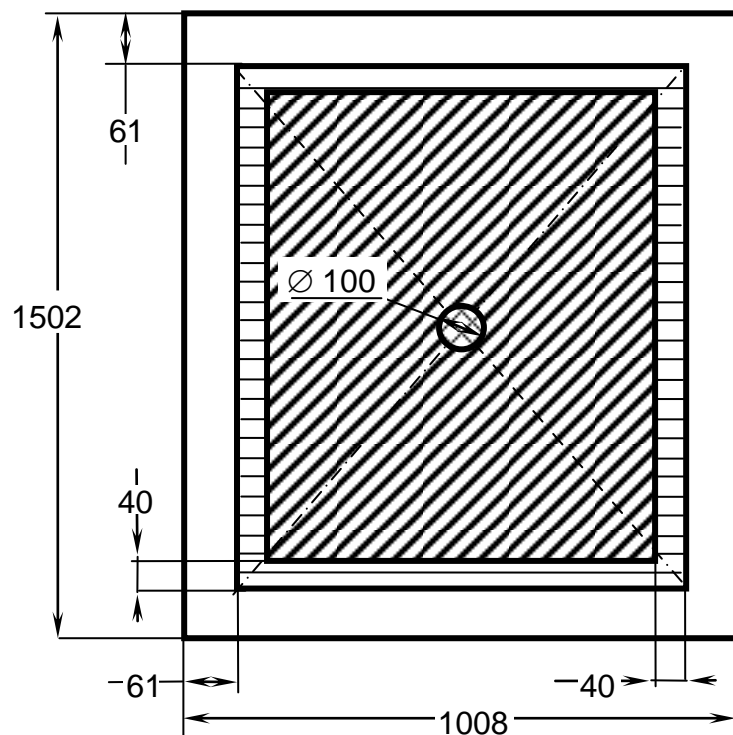


Рис. 3.3. Конструктивна схема зразка для випробувань стільникових полікарбонатних листів щодо впливу надлишкового тиску вибуху в установці за першою схемою

Під час випробувань у фрагментах ЛСК, згідно з [129], фіксували СПЛ товщиною 4 мм, 6 мм, 8 мм. Експеримент для СПЛ однієї товщини проводили двічі [122].

### 3.1.3. Методика дослідження ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів

Зразки секцій ЛСК зі стандартного віконного ПВХ профілю, згідно з [129], були навантажені через розподільчу систему, відповідно до рис. 3.1 та до рекомендацій [122, 128].

Навантаження, прикладене до СПЛ завтовшки 4 мм; 6 мм; 8 мм, що зафіксовано в секціях ЛСК, виконаних із ПВХ профілю, здійснюється ручною лебідкою в установці першого типу. В установці другого типу навантаження до СПЛ прикладене за допомогою подання стисненого повітря через редуктор, поступово до досягнення контрольного значення тиску. Навантаження в установці першого типу вимірюють за допомогою динамометра ДПУ-0,5-2, а в установці другого типу – за допомогою манометра МП4-УУ2. Для вимірювання деформацій застосовують прогиномір годинникового типу 6ПАО з ціною поділки 0.01 мм, що встановлювали в геометричному центрі полікарбонатного листа (див. рис. 3.3 та рис. 3.4).



Рис. 3.4. Схема розташування кронштейну для прикладення навантаження та встановлення динамометра ДПУ-0,5-2 і балона стиснутого повітря з редуктором

Загальний вигляд віконних рам із ПВХ профілю зі змонтованим полікарбонатним листом під час випробування подано на рис. 3.4.



Рис. 3.5. Загальний вигляд віконних рам із ПВХ профілю зі змонтованим полікарбонатним листом під час випробування

Експериментальне дослідження СПЛ у фрагментах секцій ЛСК із конструкцією, згідно з [129], із ПВХ віконного профілю в установці першого типу проведено в послідовності, поданій нижче [122, 130, 131]. У фрагмент, зафіксований в установці за допомогою штапиків, влаштовують СПЛ завтовшки 4 мм, як зображено на рис. 3.1 і рис. 3.2. Унаслідок дії силової лебідки, прикладається тиск на навантажувальну циліндричну деталь (див. рис. 3.1). Покроково збільшуючи тиск, вимірюють його величину за показниками динамометра ДПУ-0,5-2 і величину найбільшого прогину за показниками прогиноміру годинникового типу 6ПАО. Експеримент припиняють у разі появи ознак виходу країв СПЛ із фіксаційного замка кріплення секцій. У цей момент констатують величину прикладеного навантаження та найбільший прогин у час виходу країв СПЛ із вузла замка рами. Після цього в установці закріплюють СПЛ із такою самою товщиною. Випробування повторюється в аналогічній послідовності ще один раз. По два подібні випробування повторюють для зразків



СПЛ із товщиною 6 мм та 8 мм. Випробування в установці другого типу проводять у такій самій послідовності, однак зусилля прикладають через пуск стиснутого повітря з балона через редуктор у внутрішній простір кожуху, що накладений на раму з ПВХ, і фіксацію тиску за показниками манометра МП4-УУ2.

### **3.2. Методика визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення**

Для використання розробленого математичного апарату у вигляді рівняння (2.6) необхідно мати дані щодо розподілених сил тертя, що утримують краї СПЛ у вузлах кріплення. Необхідні дані мають бути визначені за допомогою експериментальних досліджень. Для експериментальних досліджень розроблено методику.

#### **3.2.1. Обладнання для дослідження розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення**

Основне завдання експериментальних досліджень СПЛ для визначення розподілених сил тертя, що фіксують стільникові полікарбонатні листи в замках кріплення, – проведення тестів, в умовах яких силу з боку навантажувальної лебідки поступово прикладають до краю СПЛ, закріпленого в замках фрагменту рами секції ЛСК, до величин, за яких край СПЛ виходить із вузла кріплення [122]. Величину зусилля, що фіксують, називають показником сили тертя, яка утримує краї СПЛ у замках кріплення фрагменту рами секції ЛСК.

Для експериментальних досліджень застосовано експериментальну установку, що складається з фіксаційної рами, навантажувального вузла у вигляді силової лебідки та вимірювального обладнання [122]. Основне вимірювальне й апаратне обладнання для проведення експериментальних досліджень представлено в табл. 3.2.

## Засоби вимірювальної та випробувальної техніки

Назва засобів вимірювальної техніки	Заводський номер	Дата повірки		№ свідоцтва
		останньої	наступної	
Випробувальна машина Fm-1000		13.06.2016 р.	13.06.2021 р.	Ua/04/160664/230812
Динамометр	51341	22.06.2016 р.	22.06.2021 р.	39-02/0905

На рис 3.6 зображено схему проведення вимірювань у випробувальній установці.

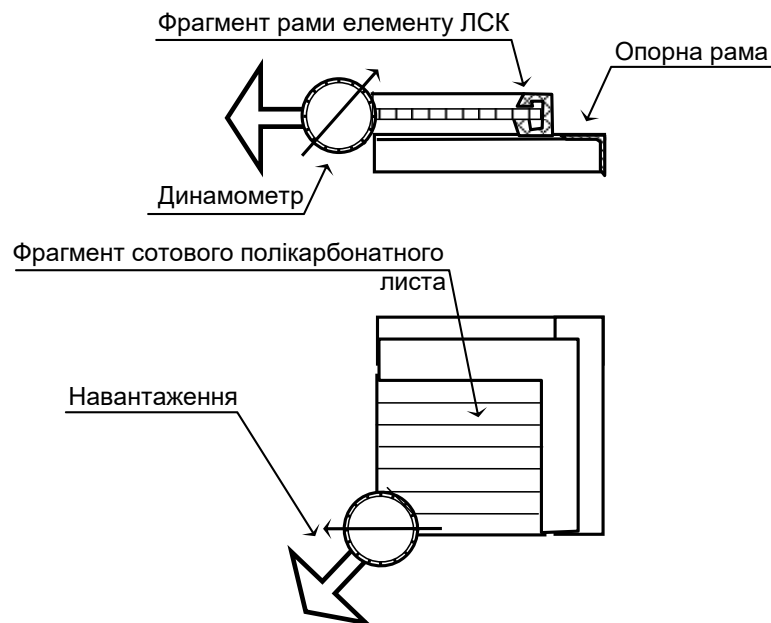


Рис. 3.6. Конструктивна схема установки для випробувань стільникових полікарбонатних листів щодо розподілених сил тертя

На рис. 3.7 продемонстровано зовнішній вигляд зразка для випробувань щодо експериментального визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення.



Рис. 3.7. Зовнішній вигляд для випробувань щодо експериментального визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові полікарбонатні листи у вузлах кріплення

Експериментальне дослідження здатності фіксування полікарбонатного листа штапиками проведено на кутових фрагментах рами розмірами  $200 \times 200$  мм зі штапиком завтовшки 36 мм та завдовжки 114 мм. Сила витягування СПЛ прикладена під кутом  $45^\circ$  до профілів фрагменту рами в площині, що проходить через серединний шар СПЛ.

Силу витягування досліджували на зразках СПЛ із загальною довжиною зафіксованого краю 100 мм ( $50 \times 50$  мм) та 150 мм ( $75 \times 75$  мм).

На рис. 3.8 подано конструктивну схему зразка, що фіксують у закріплювальній рамі установки для випробувань стосовно експериментального визначення розподілених сил тертя, що утримують стільникові СПЛ у замках кріплення фрагменту рами.

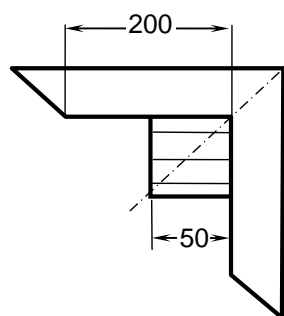


Рис. 3.8. Конструктивна схема зразка для випробувань стільникових полікарбонатних листів і дослідження сил тертя у фіксаційних замках рами

### 3.2.2. Методика дослідження сил тертя в замках фрагментів рам секцій легкоскридних конструкцій

Зразки фрагментів віконних рам із ПВХ профілю секцій ЛСК із конструкцією, згідно з [129], навантажували для витягування СПЛ. Навантаження витягування навантаження прикладали через спеціальний закріплювальний вузол.

Навантаження витягування віконних рам із ПВХ профілю секцій ЛСК із зафіксованим стільниковим полікарбонатним листом товщиною 4 мм; 6 мм; 8 мм здійснюється ручною лебідкою. Вимірювання навантаження реалізоване за допомогою динамометра ДПУ-0,5-2.

Загальний вигляд випробувальної установки для дослідження сил тертя в кутових фрагментах рам секцій ЛСК подано на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Загальний вигляд установки для випробування на визначення здатності утримання полікарбонатного листа силами тертя

Експериментальне дослідження сил тертя країв СПЛ у замках кріплення кутових фрагментів рам із ПВХ віконного профілю секцій ЛСК щодо емпіричного визначення величин розподілених сил тертя, що утримують СПЛ у замках, відбувається в певній послідовності. У закріплювальну раму установки за допомогою штапиків встановлюють зразок СПЛ завтовшки 4 мм та габаритними

розмірами  $50 \times 50$  мм, як представлено на рис. 3.7, рис. 3.9 та рис. 3.9. Дією силової лебідки через розподільчий вузол прикладається сила до краю зразка СПЛ (див. рис. 3.9). Поступово прикладаючи силу, вимірюють її величину за показниками динамометра ДПУ-0,5-2. Випробування припиняють у разі простежування виходу країв СПЛ із закріплювальних замків кутових фрагментів рам із ПВХ віконного профілю секцій ЛСК. У цей момент за показниками динамометра ДПУ-0,5-2 фіксують величину прикладеної сили біля виходу країв СПЛ із вузлів кріплення. Після цього в рамах встановлюють СПЛ із такою самою товщиною й розмірами. Експеримент проводять в аналогічних умовах у тій самій послідовності ще один раз. Два однакові випробування мають бути проведені для зразків СПЛ (завтовшки 4 мм, розміри  $75 \times 75$  мм). Описані випробування потрібно провести для зразків 6 мм та 8 мм із розмірами  $50 \times 50$  мм і  $75 \times 75$  мм.

### **3.3. Висновки до розділу**

Для визначення ефективної гнучкості та критичного переміщення розроблено експериментальну методику поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

Розроблено експериментальну методику дослідження деформативних характеристик СПЛ; експериментальну методику дослідження сил тертя між внутрішніми поверхнями замка профілю та СПЛ; методику виготовлення зразків для дослідження. Дібрано експериментальне обладнання з технічними й метрологічними характеристиками.

**РОЗДІЛ 4**  
**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**  
**ПОВЕДІНКИ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СТІЛЬНИКОВИХ ЛИСТІВ**  
**ПІД ВПЛИВОМ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ**

**4.1. Результати експериментальних досліджень щодо визначення ефективної жорсткості стільникових полікарбонатних листів**

За результатами експериментальних досліджень, одержано дані щодо імітування дії надлишкового тиску вибуху за розробленою методикою на СПЛ у рамах із ПВХ віконного профілю фрагментів секцій ЛСК із конструкцією, згідно з [129]. Дані, отримані внаслідок експерименту на установці першого типу, представлено в табл. 4.1.

*Таблиця 4.1*

**Дані щодо деформаційних і силових характеристик стільникових полікарбонатних листів у момент виходу їхніх країв із вузлів кріплення в установці першого типу**

№ зразка	Товщина СПЛ, мм	Площа прикл. зусилля СПЛ, м <sup>2</sup>	Максимальна деформація / максимальне зусилля, мм/кгс	Горизонтальне навантаження	
				сила, кгс (Н)	тиск, кгс/м <sup>2</sup> , (Па)
1	4.00	1.048	7.54/52.00	75.40 (739.674)	71.96 (705.931)
2	4.00	1.048	6.51/52.00	72.33 (709.557)	69.03 (677.188)
3	6.00	1.048	23.61/154.00	184.60 (1810.926)	176.179 (1728.313)
4	6.00	1.048	23.79/154.00	194.00 (1903.14)	185.15 (1816.32)
5	8.00	1.048	31.05/184.00	224.16 (2199.01)	213.934 (2098.692)
6	8.00	1.048	30.83/184.00	221.64 (2174.288)	211.529 (2075.099)

Аналіз даних, систематизованих у табл. 4.1, засвідчив, що дослідження проведено якісно, тому що відомості, одержані під час тестів однакових зразків, мають подібні величини. Аналогічні показники отримано щодо деформації зразків, силових показників, коли був простежуваний вихід країв СПЛ із вузлів кріплення ПВХ віконного профілю з конструкцією, відповідно до [129].

На рис. 4.1 та рис. 4.2 зображено графіки залежності деформації прогину серединної точки СПЛ від сили, що діє.

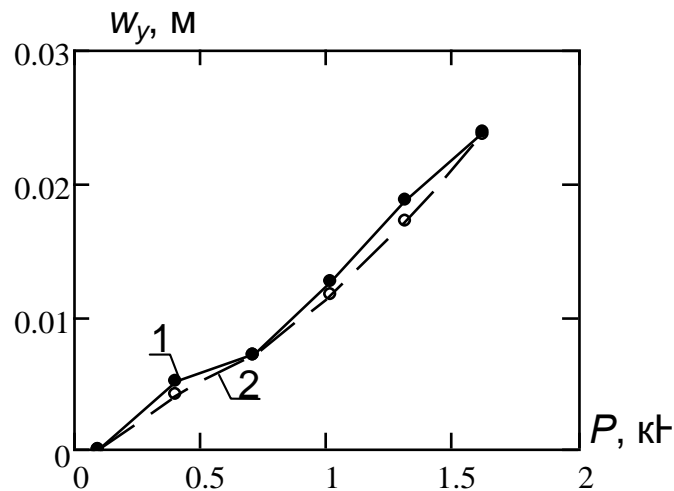


Рис. 4.1. Графік залежності переміщення від навантаження для зразків із полікарбонатними листами товщиною 6 мм: 1 – 1 дослід; 2 – 2 дослід

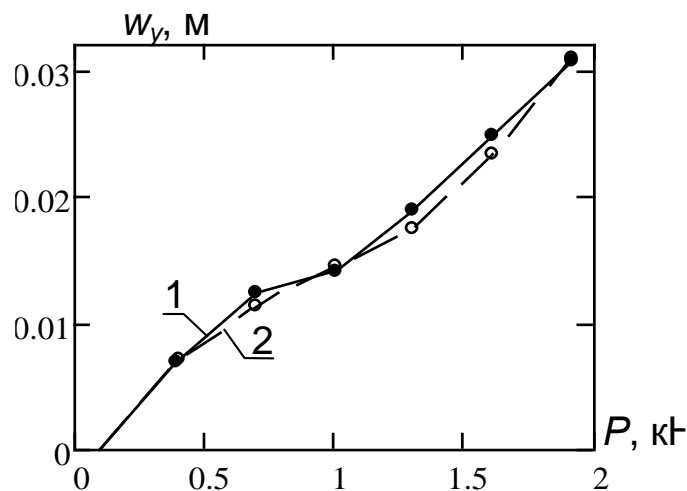


Рис. 4.2. Графік залежності переміщення від навантаження для зразків із полікарбонатними листами товщиною 8 мм: 1 – 1 дослід; 2 – 2 дослід

Аналіз графіків на рис. 4.1 та рис. 4.2 доводить, що якість експериментальних досліджень прийнятна, оскільки розбіжність між даними двох паралельних дослідів несуттєва. Важлива особливість представлених графіків виявляється в тому, що вони разом утворюють залежність, близьку до лінійної. Це підтверджує сформульовану на початку досліджень гіпотезу, що деформування СПЛ упритул до виходу їхніх країв із вузлів кріплення відбувається на ділянці виконання закону Гука. Для математичного опису процесів деформування СПЛ варто застосувати основний математичний апарат теорії пружності пластинок й оболонок. Експеримент підтверджує коректність застосування основних гіпотез та припущень, які були сформульовані в 2 розділі роботи.

На рис. 4.3 подано графіки одержаних залежностей середньої величини прогину та абсолютних експериментальних похибок зафіксованих результатів, які були отримані під час випробувань.

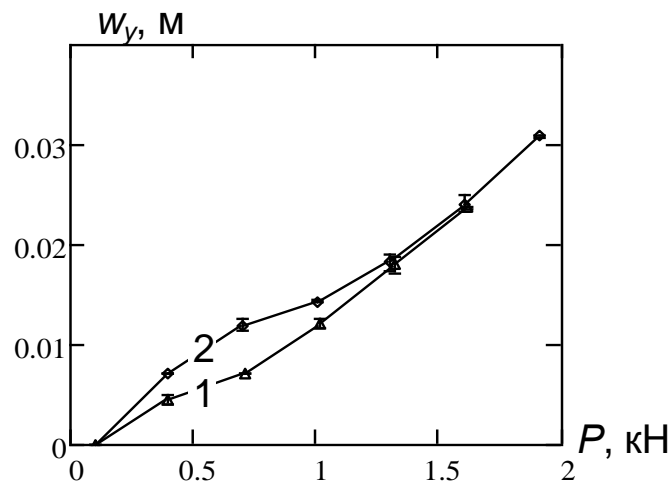


Рис. 4.3. Графіки залежностей математичного очікування та абсолютної експериментальної похибки максимального прогину стільникових полікарбонатних листів із різною товщиною, що були отримані в ході експерименту: 1 – товщина 6 мм; 2 – товщина 8 мм



Графіки на рис. 4.3 засвідчують коректність гіпотези щодо лінійності та пружності деформацій, залежно від прикладеної сили. Унаслідок проведених експериментів, отримано якісні дані.

Дані, одержані під час проведення експерименту на установці другого типу, узагальнено в табл. 4.2.

*Таблиця 4.2*

**Дані щодо деформаційних та силових характеристик стільникових полікарбонатних листів у момент виходу їхніх країв із вузлів кріплення в установці другого типу**

№ зразка	Товщина СПЛ, мм	Площа СПЛ, м <sup>2</sup>	Максимальна деформація / максимальне зусилля, мм/кПа	Горизонтальне навантаження: тиск, Па
1	4.00	1.285	7.9/0.66	740
2	4.00	1.285	7.01/0.654	764.1
3	6.00	1.285	24.41/1.640	1714.16
4	6.00	1.285	26.59/1.640	1794.11
5	8.00	1.285	31.22/1.910	2026.44
6	8.00	1.285	31.83/1.910	2044.12

Згідно з даними табл. 4.2, дослідження на другій установці проведені якісно, тому що відомості, одержані під час тестів однакових зразків, мають подібні величини. Аналогічні дані отримано під час проведення дослідів на другій установці щодо деформації зразків і силових показників, коли був простежуваний вихід країв СПЛ із вузлів кріплення ПВХ віконного профілю з конструкцією, відповідно до [129].

На рис. 4.4 подано графіки одержаних залежностей середньої величини прогину та абсолютних експериментальних похибок зафіксованих результатів, які були отримані під час випробування на установці другого типу.

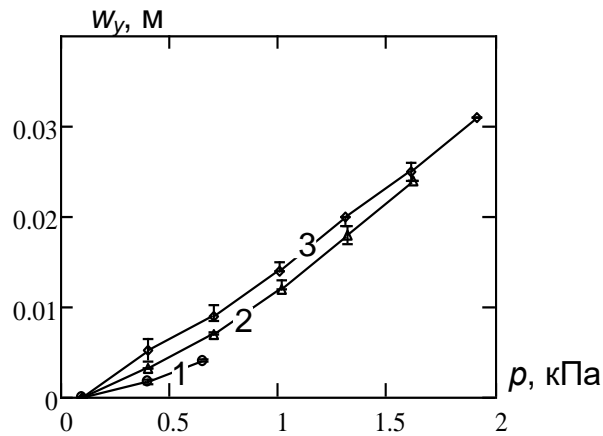


Рис. 4.4. Графіки залежностей математичного очікування та абсолютної експериментальної похибки максимального прогину стільникових полікарбонатних листів із різною товщиною, що були отримані в ході експерименту: 1 – товщина 4 мм; 2 – товщина 6 мм; 3 – товщина 8 мм

Графіки на рис. 4.3 підтверджують коректність гіпотези щодо лінійності та пружності деформацій, залежно від прикладеної сили. Унаслідок проведених експериментів, отримано якісні дані.

#### 4.2. Результати експериментальних досліджень щодо визначення ефективних сил тертя стільникових полікарбонатних листів

Результати випробувань кутових з'єднань із полікарбонатними листами товщиною 4; 6; 8 мм представлено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

##### Результати визначення сил утримання стільникових полікарбонатних листів у вузлах кріплення рам

№ зразка	Товщина полікарбонату, 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)

На рис. 4.5 подано графіки одержаних залежностей середньої величини прогину та абсолютних експериментальних похибок зафіксованих результатів, які отримані під час випробувань на установці другого типу.

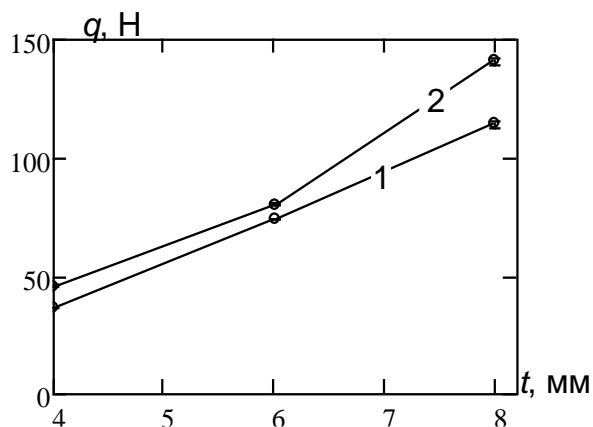


Рис. 4.5. Графіки залежностей математичного очікування та абсолютної експериментальної похибки сили утримування від товщини стільникових полікарбонатних листів із різною загальною довжиною зафіксованого краю: 1 – 100 мм (50×50 мм) 2 – 150 мм (75×75 мм)

### 4.3. Розрахункова методика визначення ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів

Для визначення ефективної жорсткості СПЛ, що утримують СПЛ у вузлах кріплення рам, застосовано розрахункові схеми, представлені на рис. 2.5 та рис. 2.7. З огляду на умови прикладення навантаження під час експерименту (див. рис. 3.1 та рис. 3.3), побудовано розрахункові схеми прикладення навантаження, зображені на рис. 4.5.

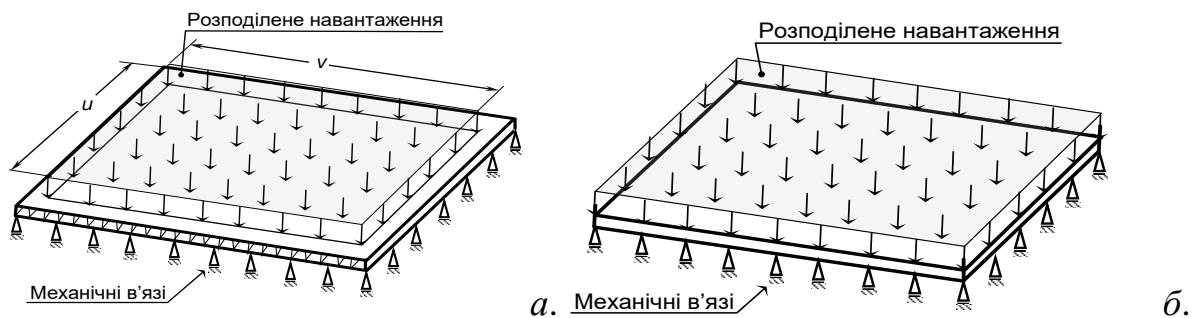


Рис. 4.5. Розрахункова схема прикладення навантаження в експериментальних установках: а – першого типу; б – другого типу

Для визначення розрахункових характеристик: ефективної жорсткості й ефективного критичного переміщення країв СПЛ складено рівняння рівноваги, із використанням рівняння (2.1). Розрахункові схеми, зображені на рис. 4.5, зумовлені іншим записом для визначення сили опору СПЛ завдяки пружним внутрішнім силам має вигляд, поданий нижче [124 – 128].

Для випробувань на установці I типу:

$$Q_y = \frac{w_{\max} \pi^6 D \cdot u \cdot v}{16} \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{n\pi v}{2b}}{m \cdot n \cdot \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \right]^{-1}; \quad (4.1)$$

для випробувань на установці II типу:

$$Q_y = \frac{w_{\max} \pi^6 D \cdot a \cdot b}{16} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{(2m+1)+(2n+1)}{2}-1}}{(2m+1)(2n+1) \left( \frac{(2m+1)^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{b^2} \right)^2} \right]^{-1},$$

де  $u = 806$  мм,  $v = 1300$  мм – найменший і найбільший розміри розподіленого навантаження, що прикладене до СПЛ. У цьому випадку вони збігаються з розмірами навантажувальної пластини випробувальної установки (див. рис. 3.3).

Для певного випадку за конкретного значення максимального прогину та значення прикладеного зусилля, згідно з рис. 4.1 і рис. 4.2, записують рівняння рівноваги, що має такий вигляд:

для випробувань на установці I типу

$$P_i - \frac{w_{i\max} \pi^6 u v D}{16 \cdot \Omega} - 2q_{mp} \Theta_i = 0;$$

для випробувань на установці II типу

$$P_i - \frac{w_{i\max} \pi^6 a b D}{16 \cdot \Omega} - 2q_{mp} \Theta_i = 0,$$

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

$$\Theta_i = \frac{b\pi w_{i\max}}{\sqrt{a^2 + \pi^2 w_{i\max}^2}} + \frac{a\pi w_{i\max}}{\sqrt{b^2 + \pi^2 w_{i\max}^2}};$$

для випробувань на установці I типу

$$\Omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \sin \frac{m\pi}{2a} \sin \frac{n\pi}{2b}}{m \cdot n \cdot \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}; \quad (4.3)$$

для випробувань на установці II типу

$$\Omega = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{(2m+1)+(2n+1)}{2}-1}}{(2m+1)(2n+1) \left( \frac{(2m+1)^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{b^2} \right)^2}.$$

Усі величини є числовими параметрами, а ефективні характеристики  $D$  та  $q_{\text{тр}}$ , які необхідно визначити, входять у рівняння (4.2) як лінійні характеристики. Для їх визначення складають систему з лінійних рівнянь, використовуючи отримані експериментальні дані. Для експериментальних даних щодо СПЛ товщиною 4 мм складають щонайменше два рівняння. Для СПЛ 6 мм та 8 мм – 6 і 7 рівнянь, що збігається з кількістю експериментальних точок, поданих на рис. 4.1 та рис. 4.2.

Перед виходом кінців СПЛ утримувальна сила у вузлі кріплення стримує їх переміщення. Після досягнення силами тертя критичного значення відбувається рух кінців СПЛ, і вони виходять із вузла кріплення.

Для визначення ефективної жорсткості системи через перетворення виразу (4.2) були записані вирази, подані нижче:

для випробувань на установці I типу

$$D = \frac{16\Omega(P_{\text{кр}} - 2q_{\text{тр}}\Theta_{\text{кр}})}{w_{\text{кр max}} \nu \pi^6}; \quad (4.4)$$

для випробувань на установці II типу

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

де  $q_{тр}$  – максимальна утримувальна сила тертя, що визначена експериментально (див. табл. 4.2);

$P_{кр}$  – критична сила виходу країв СПЛ із вузла кріплення, що визначена експериментально (див табл. 4.1);

$\Theta_{кр}$  – параметр, який визначений за критичним значенням прогину  $w_{кр\ max}$  із використанням виразу (4.3).

Критичне значення прогину визначають через лінійну екстраполяцію за залежностями максимального прогину від прикладеного навантаження, графіки яких подано на рис. 4.1 та рис. 4.2. Схема екстраполяції відповідно до рекомендацій, сформульованих у праці [122, 124 – 128], запропонована на рис. 4.6.

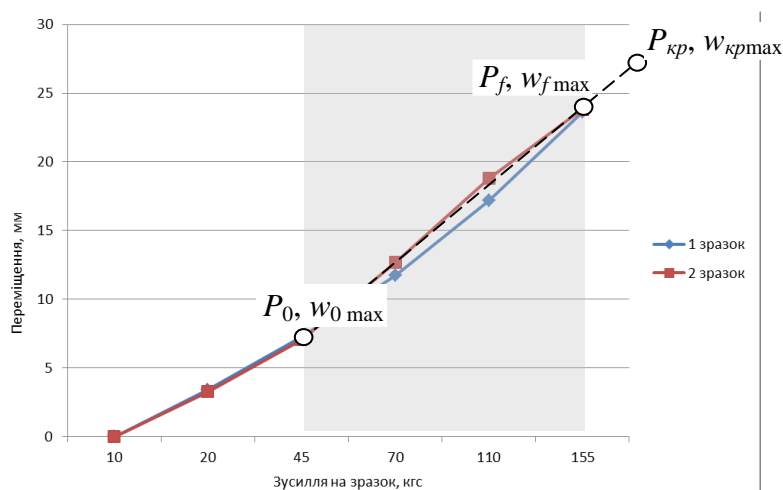


Рис. 4.6. Схема вибору експериментальних точок для визначення ефективних параметрів для стільникових полікарбонатних листів

#### 4.4. Результати визначення ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів

У ході використання формул (4.4) необхідно визначити основні геометричні параметри та розрахункові параметри за формулами (4.3). Параметри були визначені для всіх типів СПЛ із конструкцією, відповідно до [129]. Визначені параметри для реалізації формули (4.4) представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

**Розрахункові параметри для визначення ефективних характеристик  
стільникових полікарбонатних листів**

Товщина СПЛ, $h$ , мм	Параметр												
	$a$ , мм	$b$ , мм	$u$ , мм	$v$ , мм	$w_{0 \max}$ , мм	$w_{f \max}$ , мм	$P_0$ , кН, ( $p_0$ , кПа)	$P_f$ , кН, ( $p_f$ , кПа)	$P_{кр}$ , кН, ( $p_{кр}$ , кПа)	$w_{кр \max}$ , мм	$q_{гр}$ , кН/м	$\Theta_{кр}$	$\Omega$ , м <sup>3</sup>
Для випробування в установці I типу													
4	886	1380	806	1300	3.533	7.065	0.294	0.49	0.73	11.148	0.336	0.076	0.318
6					7.11	23.73	0.706	1.521	1.91	30.213	0.634	0.208	
8					14.47	30.94	1.004	1.815	2.23	38.163	1.041	0.264	
Для випробування в установці II типу													
4	886	1380	806	1300	3.95	7.45	0.301	0.445	0.754	11.418	0.336	0.077	0.364
6					7.11	25.46	0.714	1.614	1.754	30.243	0.634	0.207	
8					14.47	31.51	1.064	1.876	2.354	38.663	1.041	0.263	

Таблиця 4.5

**Ефективні характеристики стільникових полікарбонатних листів  
для розрахунку конструктивних параметрів легкоскридних конструкцій**

Ефективний параметр	Товщина стільникових полікарбонатних листів		
	4 мм	6 мм	8 мм
Для випробування в установці I типу			
Ефективна жорсткість, $D$ , Н·м	298.115	264.116	214.654
Критичне переміщення, $\Delta x_{кр}$ , мм	2.915	7.868	9.463
Для випробування в установці II типу			
Ефективна жорсткість, $D$ , Н·м	289.064	254.196	206.044
Критичне переміщення, $\Delta x_{кр}$ , мм	2.864	7.764	9.969
Середнє значення			
Ефективна жорсткість, $D$ , Н·м	293.59	259.156	210.349
Критичне переміщення, $\Delta x_{кр}$ , мм	2.889	7.816	9.716

На підставі використання розрахункових даних, представлених у табл. 4.4, за формулами (4.4) була визначена ефективна жорсткість СПЛ із різною товщиною для різного типу прикладених навантажень за схемою, відповідно до установок I типу та II типу. Також унаслідок застосування формули (2.9) визначено критичне

переміщення краю СПЛ у вузлі кріплення. Отримані дані систематизовано в табл. 4.5.

Одержані ефективні характеристики для СПЛ несуттєво відрізняються від даних, отриманих на установках першого та другого типів. Отже, їх варто використовувати для розроблення методики конструктивних параметрів ЛСК із конструкцією, згідно з [129]. Для цього запропоновано використати середні значення.

#### **4.5. Висновки до розділу**

Для визначення ефективної гнучкості та критичного переміщення проведено експериментальні дослідження поведінки безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху.

Розроблено методику визначення ефективної гнучкості СПЛ на основі математичної моделі. Визначено ефективну гнучкість СПЛ на основі отриманих експериментальних даних.

Розроблено методику визначення критичного переміщення країв СПЛ у замках віконного профілю ПВХ на основі математичної моделі. Визначено критичне переміщення країв СПЛ у замках віконного профілю ПВХ на основі отриманих експериментальних даних.



**РОЗДІЛ 5**  
**РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ**  
**ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ**  
**НА ОСНОВІ СТІЛЬНИКОВИХ ПОЛІКАРБОНАТНИХ ЛИСТІВ**

**5.1. Визначення критичного прогину стільникових полікарбонатних листів**

У ході проектування ЛСК на основі СПЛ із конструкцією, відповідно до [129], як основні конструктивні параметри мають бути визначені ширина (найменший розмір і висота (найбільший розмір)) прорізів рам віконного профілю. Для цього використано рівняння рівноваги типу рівняння (4.4). У рівняння мають входити тільки конструктивні параметри. Критичний прогин визначають за формулою (2.8), за значеннями критичних переміщень країв СПЛ у вузлах кріплення. Після виконання нескладних математичних перетворень отримано формулу для критичного прогину, з урахуванням найменшого розміру прорізу ЛСК, що має такий вигляд:

$$w_{кр} = \frac{9a^2}{\pi(a - 2\Delta x_{кр})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(a - 2\Delta x_{кр}). \quad (5.1)$$

Підставляючи у вираз (4.4) параметри, отримуємо рівняння, у якому конструктивні параметри  $a$  та  $b$  – перемінні, що дає змогу зафіксувати зв'язок між ними. Отримане рівняння має такий вигляд [125 – 127, 129 – 131]:

$$P_{вид} ab - \left[ \frac{9a^2}{\pi(a - 2\Delta x_{кр})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(a - 2\Delta x_{кр}) \right] \frac{\pi^6 ab D_h}{16} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{(2m+1)+(2n+1)-1}{2}}}{(2m+1)(2n+1) \left( \frac{(2m+1)^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{b^2} \right)^2} \right]^{-1} - \frac{2q_{mp} \left( \frac{9a^2}{\pi(a - 2\Delta x_{кр})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(a - 2\Delta x_{кр}) \right) b \pi}{\sqrt{a^2 + \pi^2 \left( \frac{9a^2}{\pi(a - 2\Delta x_{кр})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(a - 2\Delta x_{кр}) \right)^2}} - \frac{2q_{mp} \left( \frac{9a^2}{\pi(a - 2\Delta x_{кр})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(a - 2\Delta x_{кр}) \right) a \pi}{\sqrt{b^2 + \pi^2 \left( \frac{9a^2}{\pi(a - 2\Delta x_{кр})} - \frac{12a}{\pi} + \frac{3}{\pi}(a - 2\Delta x_{кр}) \right)^2}} = 0. \quad (5.2)$$

## 5.2. Методика визначення мінімальної ширини секції легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів

Для визначення проектних характеристик ЛСК на основі СПЛ із конструкцією, відповідно до [129], мають бути застосовані прості інженерні розрахункові методики. Унаслідок розв'язання рівняння (5.2) методом простих ітерацій за методикою, що описана в праці [115], побудовані номограми для визначення параметру  $a$ , залежно від параметра  $b$ , за певного надлишкового тиску, для якого потрібно забезпечити відкриття ЛСК на основі СПЛ різної товщини. Побудовані номограми представлено на рис. 5.1.

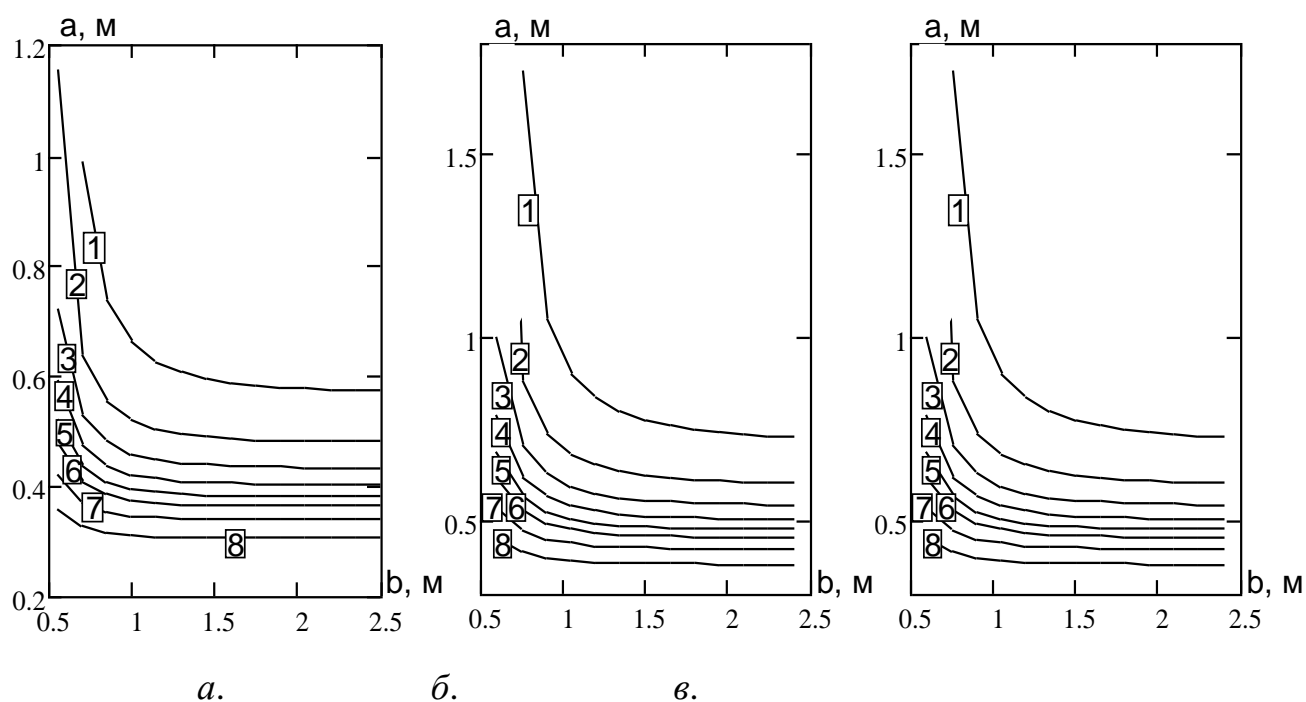


Рис. 5.1. Номограми для визначення параметра  $a$ , залежно від параметра  $b$ , легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів товщиною 4 мм ( $a$ ), товщиною 6 мм ( $б$ ) та товщиною 8 мм ( $в$ ) за певного надлишкового тиску, для якого потрібно забезпечити відкриття: 1 – 2500 Па; 2 – 5000 Па; 3 – 7500 Па; 4 – 10000 Па; 5 – 12500 Па; 6 – 15000 Па; 7 – 20000 Па; 8 – 30000 Па

Для визначення конструктивного параметра  $a$  за попередньо прийнятими значеннями надлишкового тиску вибуху та висоти прорізу секції ЛСК використовують номограми, представлені на рис. 5.1. Надлишковий тиск визначають із попереднього розрахунку. Висоту прорізу секції ЛСК визначають, зважаючи на дизайн приміщення та зручність розташування секцій ЛСК. У ході вибору висоти секцій ЛСК звертають увагу на обмеження: висота прорізу секції ЛСК має бути не меншою за 500 мм. У ході використання номограм рис. 5.1 для визначення конструктивного параметра  $a$  за проміжними значеннями надлишкового тиску вибуху та висоти прорізу секції ЛСК застосовують лінійну інтерполяцію.

Розроблені номограми подають у вигляді таблиць, які також використовують для визначення мінімальної ширини секції ЛСК на основі СПЛ (див. табл. 5.1).

Таблиця 5.1

**Розрахункові параметри для визначення конструктивних характеристик  
ЛСК на основі стільникових полікарбонатних листів**

<b>СПЛ із товщиною 4 мм</b>															
<b>Надлишковий тиск 2.5 кПа</b>															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	1.3	0.99	0.74	0.66	0.63	0.61	0.6	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57
<b>Надлишковий тиск 5 кПа</b>															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	1.15	0.64	0.55	0.52	0.51	0.5	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
<b>Надлишковий тиск 7.5 кПа</b>															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	0.72	0.53	0.48	0.46	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43



Продовження табл. 5.1

Надлишковий тиск 10 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	0.79	0.62	0.57	0.54	0.53	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Надлишковий тиск 12.5 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	0.69	0.57	0.53	0.51	0.5	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Надлишковий тиск 15 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	0.62	0.53	0.5	0.48	0.47	0.47	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
Надлишковий тиск 20 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	0.54	0.48	0.45	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42
Надлишковий тиск 30 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	0.46	0.42	0.4	0.39	0.39	0.39	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
СПЛ із товщиною 8 мм															
Надлишковий тиск 2.5 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	-	-	1.56	1.07	0.93	0.87	0.83	0.81	0.79	0.78	0.77	0.77	0.76	0.76	0.76
Надлишковий тиск 5 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	-	1.41	0.87	0.75	0.7	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.62
Надлишковий тиск 7.5 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, <i>b</i> , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, <i>a</i> , м	-	0.9	0.7	0.64	0.61	0.59	0.58	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56

Продовження табл. 5.1

Надлишковий тиск 10 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	-	0.74	0.62	0.58	0.55	0.54	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Надлишковий тиск 12.5 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	-	0.66	0.57	0.53	0.52	0.51	0.5	0.5	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
Надлишковий тиск 15 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	0.94	0.6	0.53	0.5	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Надлишковий тиск 20 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	0.71	0.53	0.48	0.46	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
Надлишковий тиск 30 кПа															
Мінімальна висота прорізу секції ЛСК, $b$ , м	0.5	0.55	0.7	0.85	1	1.15	1.3	1.45	1.6	1.75	1.9	2.05	2.2	2.35	2.5
Мінімальна ширина прорізу секції ЛСК, $a$ , м	0.55	0.45	0.42	0.41	0.4	0.4	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39

Отже, методика добору конструктивних параметрів секцій ЛСК на основі СПЛ із конструкцією, відповідно до [129, 132], передбачає виконання низки процедур.

1. Відповідно до рис. 5.2, вибирають мінімальну висоту секції ЛСК  $b$ , з огляду на вимоги дизайну та архітектури зведення поверху. Тобто висоту може визначати проектувальник-конструктор будівлі.

2. Виконуючи попередні розрахунки, визначають величину надлишкового тиску вибуху.

3. Залежно від розташування ЛСК добирають товщину СПЛ. Якщо ЛСК розташовані у внутрішніх приміщеннях, мають бути застосовані СПЛ товщиною 4 мм. Якщо ЛСК встановлюють в огороження будівлі від зовнішнього простору,

потрібні СПЛ товщиною 8 мм. Встановлення СПЛ товщиною 6 мм потребує додаткового обґрунтування з урахуванням вітрових навантажень у місцевості.

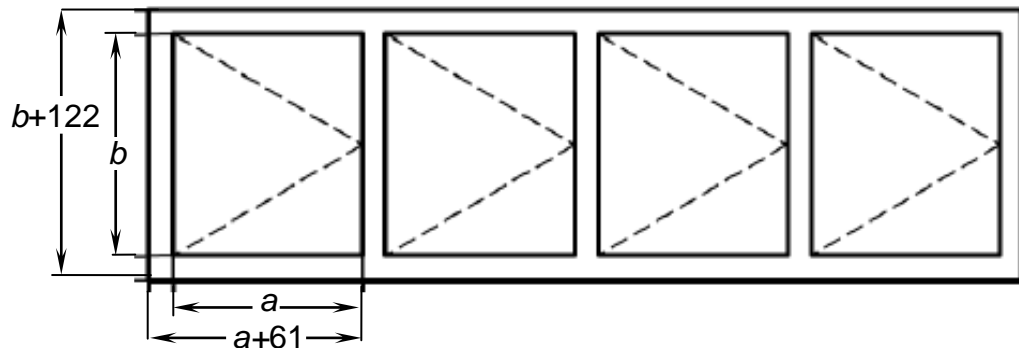


Рис. 5.2. Схема розташування секцій легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів

4. За значеннями надлишкового тиску та товщини СПЛ визначається частина табл. 5.1 для визначення конструктивного параметру ширини прорізу секції ЛСК. У табл. 6.1 вибирають більше та менше найближчі значення висоти прорізу секції ЛСК і значення ширини прорізу.

5. Застосовуючи лінійну інтерполяцію, визначають мінімальну ширину прорізу секції СПЛ. В остаточному варіанті ширини прорізу до уваги беруть дизайнерські або архітектурні рішення, збільшують ширину прорізу від мінімального значення, але не більше за 1,75 м.

### **5.3. Перевірка адекватності результатів, отриманих із використанням розробленої розрахункової методики**

#### **5.3.1. Загальне формулювання завдання щодо спрацьовування легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів**

Для перевірки адекватності розроблених моделей використовують математичний апарат, описаний у п. 2.3, і проводять чисельний експеримент.

Результатом такого чисельного експерименту може бути інформація про повне (часткове) розкриття ЛСК або їх нерозкриття. Математичний апарат уможлиблює формулювання завдання, з огляду на всі особливості деформування системи. Сформульовані основні припущення.

1. Для моделювання процесу деформування СПЛ у стандартному віконному профілі з конструкцією, відповідно до [129, 132], застосовують метод кінцевих елементів у реалізації розрахунків за явним методом.

2. Для реалізації розрахунків застосовано планарні кінцеві елементи (КЕ) за схемою Беличко – Цая [117–121], що передбачає інтегрування за товщиною у 5 внутрішніх точках.

3. СПЛ моделюють як неоднорідну структуру з відтворенням кожної перепонки, що має реальні розміри.

4. Матеріал СПЛ є ізотропним, нелінійно деформованим, складається із двох лінійних діаграм на зразок діаграми Прандтля.

5. У ході розв'язання завдання беруть до уваги геометричну та фізичну нелінійність із наявними процесами тертя країв СПЛ у замках стандартного віконного профілю.

6. Критерієм повного спрацювання ЛСК із конструкцією, відповідно до [129], слугує повний вихід країв СПЛ за краї пластини, що моделює замки стандартного віконного профілю. Якщо відбувається частковий вихід або виходу немає, то вважають, що ЛСК не спрацювала.

### **5.3.2. Геометрія розрахункової області**

На рис. 5.3 подано геометричну конфігурацію розрахункової області, що охоплює СПЛ та узагальнену поверхню, яка моделює замок стандартного віконного профілю. Вибрано розміри, подані на рис. 3.3.

Геометрична модель складається з площин, що відображають розрахункову область поверхонь і стільників. Також на рис. 5.3 представлена внутрішня



поверхня замка стандартного профілю, оскільки саме вона сприймає основні навантаження, тут формуються основні сили тертя.

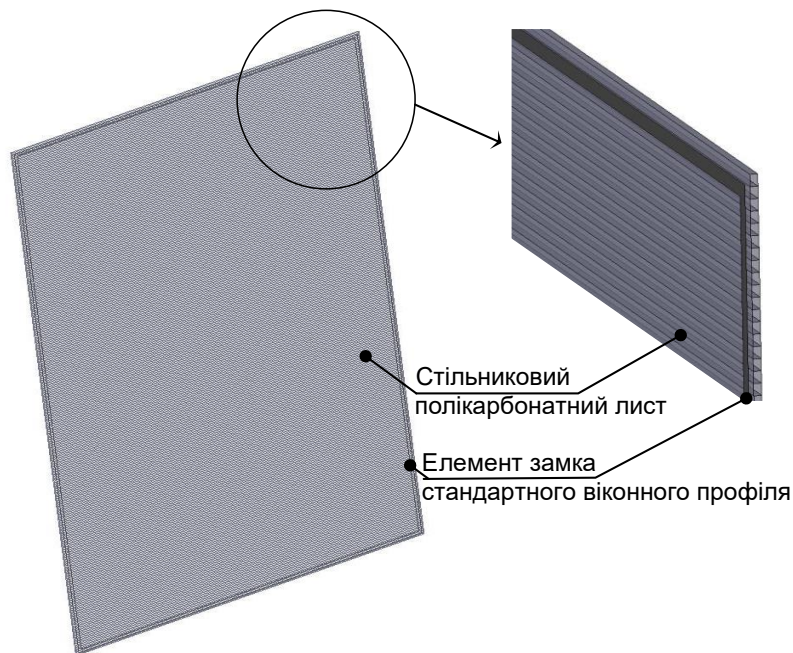


Рис. 5.3. Геометрія розрахункової області для моделювання поведінки полікарбонатного стільникового листа в замках стандартного віконного профілю в умовах вибуху

### 5.3.3. Властивості матеріалів

У процесі розрахунків зважають на фізичну нелінійність. У такому разі застосовують модель матеріалу, в основі якої лежить діаграма деформування. Діаграма деформування полікарбонату є типовою діаграмою деформування полімерів і має вигляд, зображений на рис. 5.4.

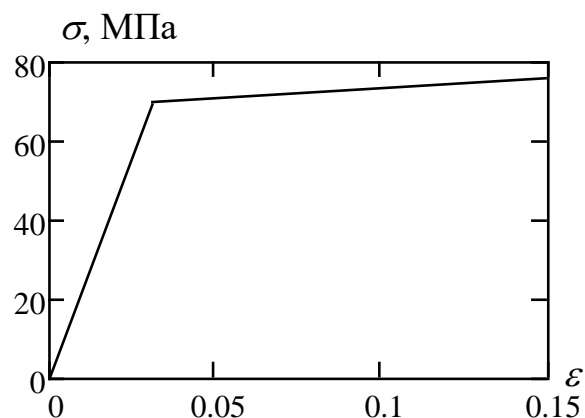


Рис. 5.4. Діаграма деформування полікарбонату

Матеріал у пружній зоні деформується згідно з узагальненим законом Гука, за яким компоненти дівіатора напружень Коши визначають за виразом [117, 128]:

$$s_{ij} = 2G \dot{\varepsilon}_{i,j}. \quad (5.3)$$

Настання пластичних деформацій фіксують у разі виконання умови фон Мізеса [117, 128]:

$$\phi = J_2 - \sigma_y^2/3 = 0, \quad (5.4)$$

де  $J_2$  – другий інваріант тензору напружень.

Поточне напруження пластичності визначають за формулою:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_p \varepsilon_{eff}^p. \quad (5.5)$$

Ефективну пластичну деформацію визначають за формулою:

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}.$$

Умовний модуль пружності пластичної ділянки визначають так:

$$E_p = \frac{EE_t}{E - E_t}, \quad (5.6)$$

де  $E$  та  $E_t$  – модуль пружності на пружній ділянці та тангенціальний модуль пружності на пластичній ділянці.

Тиск на контактну поверхню визначають за виразом:

$$p = E_b \left( \frac{1}{V} - 1 \right), \quad (5.7)$$

де  $E_b$  – об’ємний модуль пружності;

$V$  – відносний об’єм.

У табл. 5.2 зазначено основні параметри щодо моделі механічних властивостей полікарбонату [122, 128].

Таблиця 5.2

Модуль пружності, $E$ , МПа	Танг. модуль пружності діл. пласт., $E_t$ , МПа	Об’ємний модуль пружності, $E_b$ , МПа	Дотичний модуль пружності, $G$ , МПа	Коефіцієнт Пуасона, $\nu$	Границя текучості, $\sigma_0$ , МПа
2271	50	3785	811.1	0.4	70

#### 5.3.4. Граничні умови

Для перевірки адекватності результатів розробленої методики прийнято навантаження, що відповідає найбільш використовуваному критерію надлишкового тиску та дорівнює 5 кПа. Згідно з результатами досліджень, описаних у працях [111–114, 128], тиск під час вибуху змінюється за кривою, що зображена на рис. 5.5.

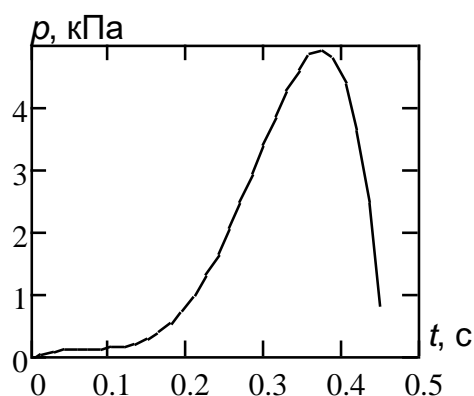


Рис. 5.5. Графік зміни тиску вибуху залежно від часу з максимальним надлишковим тиском вибуху 5 кПа

Схема прикладення тиску та механічних в'язів повністю збігається зі схемою, що зображена на рис. 2.6.

### 5.3.5. Кінцево-елементна схема

У ході накладення сітки з кінцевих елементів (КЕ), з огляду на специфіку побудованої геометричної області, вибраний тип КЕ – планарні оболонкові КЕ типу Беличко – Цая з 5 точками інтегрування за товщиною. Геометрична форма й розрахункова схема КЕ представлені на рис. 5.6.

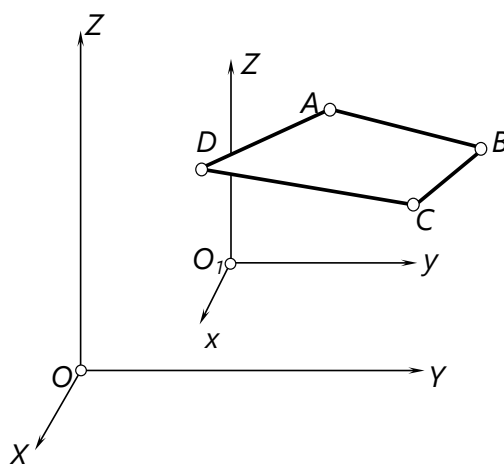


Рис 5.6. Геометрична форма вибраного типу кінцевого елемента

Відповідно до типу вибраного кінцевого елемента, побудовано кінцево-елементну схему полікарбонатного стільникового листа в замку стандартного віконного профілю. Побудована кінцево-елементна схема зображена на рис. 5.7. На цій схемі позначені кінцеві елементи, що мають різний тип матеріалу й належать до різних частин, для яких виконувані всі співвідношення та умови контакту. Важлива особливість кінцево-елементної схеми – наявність другої частини, КЕ якої виділені темно-сірим кольором. Ця частина відтворює опорну поверхню замка стандартного віконного профілю, між якою та поверхнею СПЛ відбувається тертя. Ця частина являє собою абсолютно тверде тіло з повним блокуванням поступальних переміщень у будь-якому напрямку, як обертального руху в будь-якому напрямку.

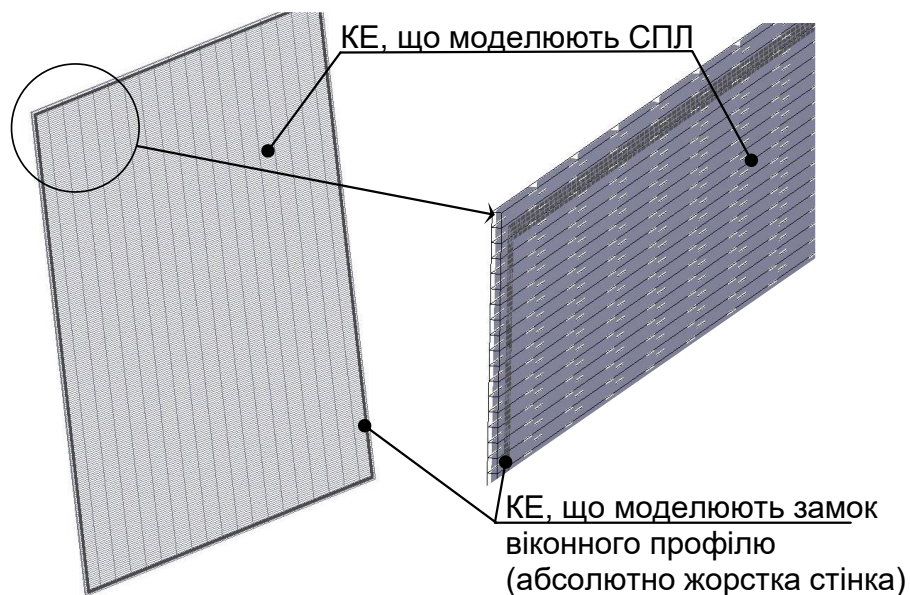


Рис. 5.7. Кінцево-елементна схема стільникового полікарбонатного листа разом із замком стандартного віконного профілю

### 5.3.6. Результати розрахунку

Після проведення розрахунків отримано дані щодо параметрів напружено-деформованого стану СПЛ товщиною 4 мм та його переміщення під час динамічного впливу вибуху. На рис. 5.8 представлено положення СПЛ товщиною 4 мм у різні моменти часу щодо замка віконного профілю.

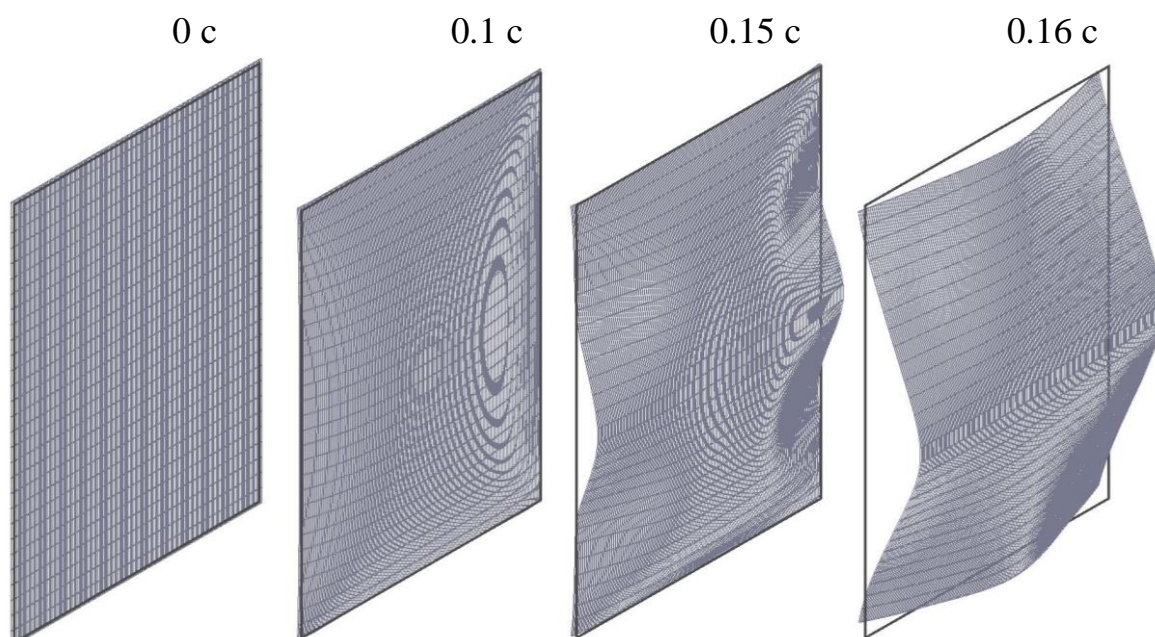


Рис. 5.8. Положення стільникового полікарбонатного листа товщиною 4 мм у різні моменти часу щодо замка віконного профілю

На рис. 5.9 зображено розподіл переміщень за напрямком, перпендикулярним до поверхні СПЛ товщиною 4 мм.

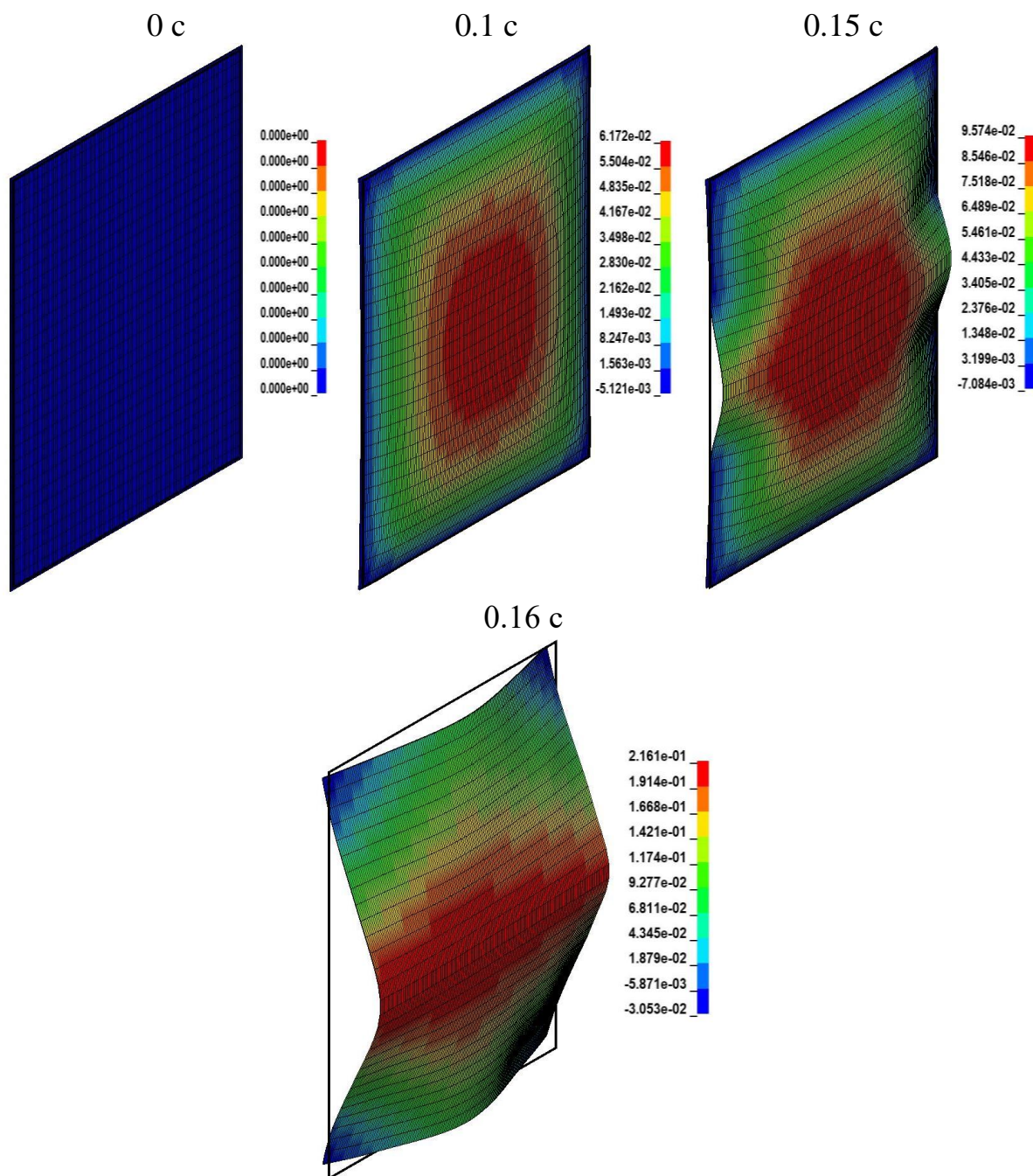


Рис. 5.9. Розподіл переміщень за напрямком, перпендикулярним до поверхні стільникового полікарбонатного листа товщиною 4 мм

Згідно з рис. 5.8 та рис. 5.9, повне відкриття СПЛ із замків віконного профілю відбувається в момент часу 0.16 с.

Аналогічні розрахунки проведені для СПЛ 6 мм та 8 мм за мінімальних геометричних розмірів прорізу, відповідно до табл. 5.1. У ході розрахунків був

прикладений тиск вибуху, який змінювався залежно від часу, що зображено на рис. 5.10.

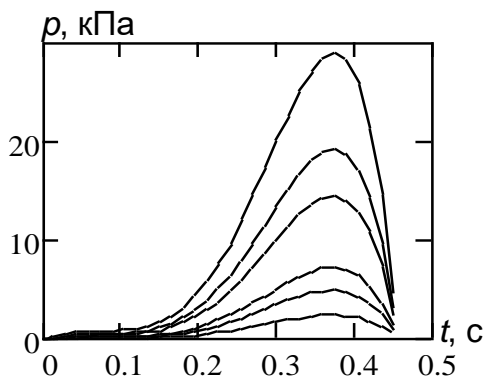


Рис. 5.10. Графік зміни тиску вибуху залежно від часу з різними значеннями надлишкового тиску вибуху

Кінцевий результат розрахунку – визначення умов повного відкриття прорізу із СПЛ. У табл. 5.3 представлено дані стосовно відносного процента СПЛ, що повністю відкрилися.

Таблиця 5.3

**Дані щодо відкриття стільникових полікарбонатних листів  
в умовах вибуху з мінімальними розмірами прорізів**

Максимальний тиск вибуху, кПа						
2.5	5	7.5	10	12.5	20	30
Кількість повністю розкритих СПЛ товщиною 4 мм, %						
100	100	100	100	100	100	100
Кількість повністю розкритих СПЛ товщиною 6 мм, %						
100	100	100	100	100	100	100
Кількість повністю розкритих СПЛ товщиною 8 мм, %						
93.3	100	100	100	100	100	100

Дані, отримані внаслідок розрахунку, засвідчили, що всі СПЛ із мінімальними розмірами прорізів повністю розкрилися, крім одного випадку для СПЛ товщиною 8 мм для максимального надлишкового тиску 2.5 кПа. Це доводить адекватність розроблених математичних моделей і рекомендацій. Для гарантування нормального відкриття ЛСК із СПЛ рекомендовано не використовувати СПЛ товщиною 8 мм для ЛСК, що застосовують для захисту від

надлишкового тиску вибуху не більше як 2.5 кПа. Їх використання має бути додатково обґрунтоване або за допомогою експерименту, або внаслідок розрахунку.

#### 5.4. Загальна методика проектування систем легкоскидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів

Методику добору конструктивних параметрів секцій ЛСК на основі СПЛ із конструкцією, відповідно до [129], варто використовувати як складник відомих методик розрахунку конструктивних параметрів ЛСК. Основою може слугувати методика, описана в працях [111–114].

Згідно із [114], загальна методика базована на виконанні низки процедур.

1. Сумарну необхідну площу ЛСК визначають за формулою:

$$S_u = \frac{0.105U_{н.р} \alpha (\varepsilon_c - 1) \beta_\mu K_\phi \sqrt[3]{\rho_0 V_g^2}}{\sqrt{\Delta P_{дон}}}, \quad (5.8)$$

де  $U_{н.р}$  – розрахункова нормальна швидкість поширення полум'я, м/с;

$\alpha$  – показник інтенсифікації вибухового горіння;

$\varepsilon_c$  – розрахунковий ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху в замкненому об'ємі;

$\beta_\mu$  – коефіцієнт заповнення об'єму приміщення вибухонебезпечною сумішшю;

$K_\phi$  – коефіцієнт форми приміщення;

$V_g$  – вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – розрахункова густина газу в приміщенні, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta P_{дон}$  – допустимий надлишковий тиск у приміщенні при вибуху; кПа.

У загальному випадку допустимий надлишковий тиск у приміщенні під час горіння вибухонебезпечної суміші  $\Delta P_{дон}$  дорівнює 5 кПа. Для середовищ, що



повільно палають (максимальна нормальна швидкість поширення полум'я  $U_{ntmax} = 0,15$  м/с),  $\Delta P_{don}$  дорівнює 3 кПа.

Якщо розрахункова видима швидкість поширення полум'я  $U_p$  перевищує 65 м/с, потрібно проводити розрахунки конструкцій будинку на стійкість до впливу вибухових хвиль, що виникають унаслідок поширення полум'я, за методиками, затвердженими в чинному порядку. Конструкції будинку не повинні руйнуватися (виходити з ладу) через підвищення надлишкового тиску вибуху в приміщенні до значення  $\Delta P_{don}$ , обумовленого виразом:

$$\Delta P_{don} = 0.003 \cdot U_p. \quad (5.9)$$

Параметри формули (5.8) визначають відповідно до методики [117].

2. Визначають коефіцієнт відкриття  $K_e$  конструкцій ЛСК за табл. 6.2, де подано усереднені величини коефіцієнтів для одинарного СПЛ різної товщини з різними розмірами прорізів, оскільки під час розрахунку ці коефіцієнти відрізняються несуттєво.

Після визначення коефіцієнта відкриття ЛСК потрібно визначити необхідну площу ЛСК за формулою:

$$S_l = S_u \setminus K_e. \quad (5.10)$$

Таблиця 6.2

**Коефіцієнти відкриття для легкокидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів різної товщини**

Товщина СПЛ, h	4 мм	6 мм	8 мм
Коефіцієнт відкриття, $K_e$	0.92	0.87	0.82

3. За методикою п. 5.2 визначають мінімальні розміри прорізу секції ЛСК  $a$  і  $b$ . За отриманими конструктивними параметрами визначають мінімальну кількість секцій ЛСК відповідно до формули:

$$N = S_l / (a \cdot b). \quad (5.11)$$

Отже, розроблена методика дає змогу розрахувати основні конструктивні параметри ЛСК на основі СПЛ із товщиною 4 мм, 6 мм та 8 мм.

### 5.5. Приклад застосування методики проектування систем легкоскидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів

Нижче проаналізовано розрахунки ЛСК на основі СПЛ із конструкцією, згідно з [129], товщиною 8 мм під час утворення у виробничому приміщенні газоповітряної вибухонебезпечної суміші. Вибухонебезпечна виробнича будівля складається з одного приміщення категорії А за вибухопожежонебезпекою відповідно до [10], як зображено на рис. 5.3.

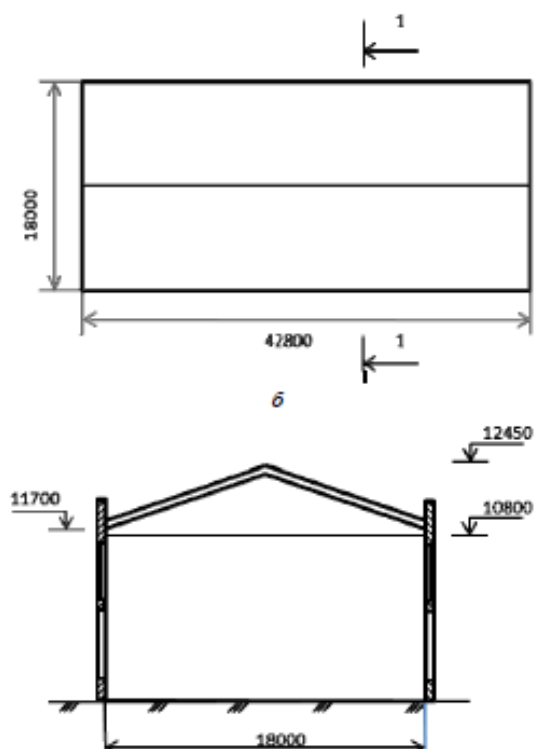


Рис. 5.3. Конструктивна схема виробничого приміщення: *a* – план; *б* – розріз

Довжина будівлі  $L = 42.8$  м, її ширина  $B = 18$  м, розрахункова висота приміщення становить  $H = 12.075$  м. Геометричний об'єм приміщення визначають за формулою:

$$V_{\text{пр}} = L \cdot B \cdot H = 42.8 \cdot 18 \cdot 12.075 = 9302.58 \text{ м}^3.$$

Згідно з прим. 2 і 4 до табл. 1 методики [111], будівельні конструкції й устаткування сягають 20 % геометричного об'єму приміщення. Тоді вільний об'єм приміщення  $V_6$  розраховують за формулою:

$$V_6 = V_{\text{пр}} (1 - 0.2) = 7442.064 \text{ м}^3.$$

У приміщенні під час аварійної ситуації може утворюватися метаноповітряна горюча суміш. Тиск і температура в приміщенні до запалення горючої суміші дорівнюють  $p_0 = 101$  кПа;  $t_0 = 20$  °С.

Коефіцієнт ступеня заповнення об'єму приміщення горючою сумішшю й участі її у вибуху  $\mu_v = 1$ .

Характеристики горючої суміші вибирають за таблицею дод. 2 методики [111]:  $\rho_{\text{max}} = 1.13$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{\text{рmax}} = 7.6$ ;  $\varepsilon_{\text{сmax}} = 9.1$ ;  $U_{\text{hmax}} = 0.28$  м/с;  $\rho_{\text{НПКР}} = 1.15$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{\text{рНПКР}} = 5.0$ ;  $\varepsilon_{\text{сНПКР}} = 6.0$ .

Коефіцієнт ступеня заповнення об'єму приміщення горючою сумішшю й участі її у вибуху  $\mu_v = 1$ .

Розрахункову нормальну швидкість поширення полум'я визначають за формулою:

$$U_{\text{н.р}} = 0.55 \cdot U_{\text{hmax}} = 0.55 \cdot 0.28 = 0.154 \text{ м/с.}$$

Розрахункову щільність газу в приміщенні перед запалюванням суміші визначають за формулою:

$$\rho_0 = \frac{0.5367 \mu_v (\rho_{\text{НПКР}} + \rho_{\text{max}})}{1 + 0.00367 t_0} + (1 - \mu_v) \frac{1.294}{1 + 0.00367 t_0} = \frac{0.5367(1.15 + 1.13)}{1 + 0.00367 \cdot 20} = 1.14 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий ступінь стиснення продуктів горіння під час вибуху в замкненому об'ємі визначають за формулою:

$$\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{\text{сНПКР}} + \varepsilon_{\text{сmax}}) = 0.5(6.0 + 9.1) = 7.55.$$

Об'єм приміщення, у якому відбувається горіння вибухонебезпечної суміші, визначають за формулою:

$$V_{\text{пл}} = 0.5 \mu_v V_{\text{пр}}(\varepsilon_{\text{рНПКР}} + \varepsilon_{\text{рmax}}) = 0.5 \cdot 1 \cdot 9302.58(5.0 + 7.6) = 58\,606.25 \text{ м}^3.$$

$$V = V_{\text{пр}} = 9302.58 \text{ м}^3.$$

Показник інтенсифікації вибухового горіння визначають через лінійну інтерполяцію за табл. 1 [111], залежно від ступеня завантаженості приміщення будівельними конструкціями та устаткуванням, а також об'єму  $V$ , у якому відбувається горіння вибухонебезпечної суміші:  $\alpha = 12.77$ .

Допустимий надлишковий тиск у приміщенні  $\Delta P_{\text{дон}} = 5$  кПа. Коефіцієнт заповнення об'єму приміщення вибухонебезпечною сумішшю  $\beta_{\mu} = 1$ .

Коефіцієнт, що враховує вплив форми приміщення та ефект витікання продуктів горіння вибухонебезпечної горючої суміші, визначають за формулою:

$$K_{\phi} = \frac{0.5(B^2 + H^2)}{\sqrt[3]{V_{\text{пр}}^2}} = 0.531.$$

Необхідну площу відкритих прорізів у зовнішньому огороженні вибухонебезпечного приміщення, за якої надлишковий тиск під час вибухового горіння ГС не перевищує  $\Delta P_{\text{дон}}$ , визначають за формулою (6.3).

$$S_u = \frac{0.105 \cdot 0.154 \cdot 12.77(7.55 - 1) \cdot 1 \cdot 0.531 \sqrt{1.14 \cdot 7442.064^2}}{\sqrt[3]{9302.58^2}} = 130.72 \text{ м}^2.$$

Розрахункову видиму швидкість поширення полум'я визначають за формулою:

$$U_p = 0.5 \alpha U_{н.р}(\varepsilon_{рНПКР} + \varepsilon_{рmax}) = 0.5 \cdot 12.77 \cdot 0.154(5.0 + 7.6) = 12.39 \text{ м/с.}$$

Оскільки  $U_p < 65$  м/с, то допустимий надлишковий тиск залишається незмінним і може дорівнювати 5 кПа.

Необхідну площу ЛСК із СПЛ товщиною 8 мм визначають за формулою:

$$S_l = S_u / K_\varepsilon = 130.72 / 0.82 = 159.415 \text{ м}^2.$$

Висота прорізу становить  $b = 1.62$  м. Знаючи висоту та допустимий надлишковий тиск, визначають найближчі значення висоти прорізу секції ЛСК за табл. 6.1 та значення ширини секції ЛСК:

$$b_1 = 1.6 \text{ м}; b_2 = 1.75 \text{ м}; a_1 = 0.64 \text{ м}; a_2 = 0.63 \text{ м};$$

Через лінійну інтерполяцію визначають мінімальну величину прорізу секції ЛСК:

$$a = a_1 + \frac{a_2 - a_1}{b_2 - b_1} (b - b_1) = 0.64 + \frac{0.63 - 0.64}{1.75 - 1.6} (1.62 - 1.6) = 0.639 \approx 0.64 \text{ м.}$$

Кінцева мінімальна ширина  $a = 0.64$  м.

Необхідна кількість секцій ЛСК із конструкцією за [129] становить:

$$N = S_l / (a \cdot b) = 159.415 / (0.64 \cdot 1.62) = 153.757.$$

Кінцево приймаємо 154 секції.

## 5.6. Висновки до розділу

Для розроблення методики визначення розмірів прорізу ЛСК із СПЛ для їх гарантованого відкриття, за умов досягнення критичного значення надлишкового

тиску вибуху, запропоновано рівняння, до якого розміри входять як незалежні змінні.

За отриманим рівнянням побудовано номограми для визначення геометричних розмірів промів ЛСК із СПЛ для їх гарантованого відкриття, за умов досягнення критичного значення надлишкового тиску вибуху. Створено таблиці для визначення проектних розмірів промів ЛСК.

Для перевірки адекватності результатів, отриманих за допомогою розроблених номограм і таблиць, побудовано математичні моделі СПЛ у замках стандартного віконного профілю. На підставі їх використання проведено чисельний експеримент.

Унаслідок чисельних експериментів доведено, що результати, отримані за номограмами й таблицями, є адекватними, оскільки для всіх випадків максимального тиску розкриття відбувалося в 100 % СПЛ, крім випадку СПЛ товщиною 8 мм для максимального надлишкового тиску вибуху 2.5 кПа.

Розроблено методику проектування ЛСК із СПЛ на основі запропонованих номограм і таблиць. Доведено, що розроблена методика має просту реалізацію та продуктивні розрахункові алгоритми, дає змогу проектувати ефективні ЛСК на основі СПЛ.

## ВИСНОВКИ

У дисертації, що є завершеним науковим дослідженням, запропоновано розв'язання актуального наукового завдання, що стосується з'ясування закономірностей залежності параметрів спрацьовування безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами від їхніх конструктивних параметрів під впливом динамічних навантажень в умовах вибуху. Це послугувало підґрунтям для розроблення розрахункової методики проектування. Одержано низку наукових і практичних результатів.

1. На підставі всебічного вивчення літературних джерел щодо сучасного стану забезпечення й методів проектування легкоскидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів сформульовано ідею про те, що належний захист проти вибуху за допомогою безінерційних легкоскидних конструкцій із гнучкими елементами можливий у разі розроблення розрахункової методики їх проектування на основі номограм і таблиць, отриманих на основі виявлених закономірностей залежності розкриття стільникових полікарбонатних листів від їхніх конструктивних параметрів і параметрів вибуху.

2. Запропоновано математичну модель, що описує поведінку стільникового полікарбонатного листа в умовах вибуху з використанням параметрів ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках віконного профілю.

3. Розроблено методику визначення ефективної жорсткості та критичного переміщення країв стільникових полікарбонатних листів у замках віконного профілю експериментально-розрахунковим методом.

4. Розроблено методику й проведено експериментальні дослідження щодо визначення переміщень і силових факторів у стільникових полікарбонатних листах в умовах дії механічного навантаження для визначення ефективної жорсткості та критичного переміщення експериментально-розрахунковим методом.

5. На основі отриманих експериментальних даних визначено параметри ефективної жорсткості, що дорівнюють 294 Нм, 259 Нм та 210 Нм, а також

критичних переміщень 2.9 мм, 7.8 мм та 9.7 мм для стільникових полікарбонатних листів 4 мм, 6 мм і 8 мм.

6. Запропоновано математичну модель для визначення ширини й висоти секцій легкоскидних конструкцій зі стільниковими полікарбонатними листами. На основі математичного апарату побудовано номограми й довідникова таблиця для визначення габаритних розмірів даних секцій легкоскидних конструкцій.

7. Розроблено вдосконалений метод проектування секцій легкоскидних конструкцій зі стільниковими полікарбонатними листами з простою реалізацією й економічними розрахунковими алгоритмами на основі запропонованих номограм та довідникової таблиці для визначення габаритних розмірів даних секцій легкоскидних конструкцій.

8. Доведено, що результати, отримані за номограмами й таблицями, є адекватними, оскільки для всіх випадків максимального тиску розкриття відбувалося в 100 % СПЛ, крім випадку СПЛ товщиною 8 мм для максимального надлишкового тиску вибуху 2.5 кПа.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національний профіль з безпеки та охорони праці 2018 рік. Інформаційно-аналітична профспілкова доповідь.
2. Травматизм на виробництві в Україні: національний профіль протягом 2009 – 2013 років. Інформаційно-аналітична профспілкова доповідь.
3. Хохотва О. І. Про стан промислової небезпеки та охорони праці. *Охорона праці*. 2010. № 12. С. 7–8.
4. Hensel W. Staubexplosionsprobleme bei der Zerkleinerung abgebrannter Brennelemente in Wiederaufbereitungsanlagen. Paper prepared for the Amts- und Mitteilungsblatt BAM. Berlin, 1988.
5. Hiirlimann H. Explosionsunterdrückung von Staubexplosionen. VDZ-Berichte [VDI-Verlag GmbH]. Dusseldorf, 1989. P. 617–657.
6. Орлов Г. Г. Легкосбрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий. М.: Стройиздат, 1987. 200 с.
7. Carson P. A., Mymford C. J. An analysis of incidents involving major hazards in the chemicals industry. *Journal of Hazardous Materials*. 1979. V. 3. № 2. P. 149–165.
8. Dorge K., Pangritz D., Wagner H. G. *Acta Astronautica*. 1976. V. 3. P. 1067–1076.
9. Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. *Journal of Hazardous Materials*. 1983. V. 8. P. 139–156.
10. Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [Чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 60 с. (Національний стандарт України).
11. Гордиенко Д. М., Лагозин А. Ю., Мордвинова А. В., Некрасов В. П., Сычев А. Н. Расчет параметров легкоосбрасываемых конструкций для взрывоопасных помещений промышленных объектов: рекомендации. М.: ВНИИПО, 2015. 48 с.

12. ТКП 45-2.02-38-2006 (02250). Конструкции легкобрасываемые. Правила расчета. Мн.: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006.
13. NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2013 Edition.
14. BS EN 14491:2012. Dust Explosion Venting Protective Systems.
15. Palmer K. N. Loss Prevention: Relief Venting of Dust Explosions, *Chemical Engineering Progress*. 1978. 70 (4), P. 57–61 (April 1974).
16. Ruchta J. M. Investigation of Fire and Explosion Accidents in the Chemical, Mining and Fuel-Related Industries-A Manual. Bulletin 680. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, 1985.
17. Liere N. Explosions- und Zündverhalten von Beschichtungspulvern in Beschichtungskabinen. *VDZ-Berichte [VDI-Verlag GmbH]*. Düsseldorf, 1989. 701. P. 321–350.
18. May H. A., Melhorn L., Marutzky R. Vermeidung der Brand- und Explosionsgefahren und Verminderung der Emissionen bei der Spinnetrocknung. *Staub-Reinhalt. Luft* 41, 1981. P. 416–420.
19. Baker W. E. *Explosions in Air*, University of Texas Press, Austin, Texas, 1973.
20. Swisdak M. M., JR. Explosion Effects and Properties: Part I – Explosion Effects in Air, NSWC/WOL/TR 75-116, Naval Surface Weapons Center, White Oak, Silver Spring, Maryland (October 1975).
21. Michelis J. Massnahmen zur Bekämpfung von Explosionen im Steinkohlenbergbau unter Tage. *VDZ-Berichte [VDI-Verlag GmbH]*, Düsseldorf, 1984. P. 259–264.
22. Moore P. E. Industrial Explosion Protection-Venting or Suppression? *Proceedings of the Industrial Chemical Engineering Symposium*. 1989. Series № 115. P. 257–279.
23. Moore P. E., Bartknecht W. Extending the Limits of Explosion Suppression Systems. *Staub-Reinhalt. Luft* 47. 1987. P. 209–213.

24. Moore P. E., Cooke P. L. Suppression of Metal Dust Explosions. Report № 88/49. Ascot, Berkshire, UK British Materials Handling Board, 1988.

25. Moore P. E., Watkins G. K. P., Vellenoweth A. C. Explosion Suppression-Its Effectiveness and Limits of Applicability.” VDZ-Berichte [VDI-Verlag GmbH]. Dusseldorfj 494, 1984. P. 247–257.

26. Keenan V. A., Tancreto J. E. Blast Environment from Fully and Partially Vented Explosions in Cubicles. Technical Report № 51-027, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, California (February 1974).

27. Muller R. Zundf&igbeit von mechanisch erzeugten Funken und heissen Oberflachen in Staub/Luft-Gemischen. VDZ-Berichte [VDI-Verlag GmbH]. Dusseldorf 701, 1989. P. 421–466.

28. Evans Z. Massive Explosions Devastate Beirut. National Review, August 4, 2020. URL: <https://www.nationalreview.com/news/massive-explosions-devastate-beirut/#slide-1//>.

29. Mullinger P. J. Fire and Explosion Protection for Pulverized Firing Systems. Proceedings of the First European Dry Fine Coal Conference, Harrogate, UK, 1987.

30. Arroll J. R. Physical and Technical Aspects of Fire and Arson Investigation, C. C. Thomas, New York, 1979.

31. Senior M. Gas Explosions in Buildings, Part IV, Strain Measurements on the Gas Explosion Chamber, Fire Research Note No. 987 Fire Research Station (March 1974).

32. Tonkin P. S., Berlemont C. F. Jr. Gas Explosions in Buildings, Part I, Experimental Explosion Chamber, Fire Research Note № 984, Fire Research Station (February 1974).

33. Perry R. H., Green D. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1984.

34. Halverson LCDR F. H. A Review of Some Recent Accidents in the Marine Transportation Mode, Paper № 52e, Presented at the AIChE Symposium on Loss

Prevention in the Chemical Industry, Houston, Texas, Loss Prevention Journal, 9. P. 76–81 (March 18-20, 1975).

35. U. S., Coast Guard Marine Casualty Report, S.S. Sansinena (Liberian): Explosion and Fire in Los Angeles Harbor, California, on 17 December 1976, with Loss of Life. Report No. USCG 16732/71895. 1977.

36. U. S. Coast Guard. S.S. V. A. Fogg: Sinking in the Gulf of Mexico on 1 February 1972, with Loss of Life. USCG/NTSB-MAR-74-8 (November 21, 1974).

37. Owen T. E. Laboratory Scale Model Studies of Electrostatics in Ship Tanks, Paper Presented at the Conference on Electrostatic Hazards in the Storage and Handling of Powders and Liquids, Chicago, Illinois (October 16–17, 1979).

38. NTSB Pipeline Accident Report, Consolidated Edison Company Explosion at 305 East 45th Street, New York, New York, April 22, 1974, NTSB-PAR-76-2, Washington, D.C., 1976.

39. Бейкер У. Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.; под ред. Я. Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986. 319 с.

40. Nickerson J. I. Dryer Explosion, Loss Prevention Journal, 8. 1976.

41. Aldis D. F., Lai F. S. Review of Literature Related to Engineering Aspects of Grain Dust Explosions. U. S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication № 1375 (August 1979).

42. Cardillo P., Anthony E. J. Dust Explosions and Fires, Guideto Literature (1957–1973), Stazione Sperimentale per X Combustibili, San Donato Milanese (March 1979).

43. Palmer K. N. Loss Prevention: Relief Venting of Dust Explosions, Chemical Engineering Progress. 1974. 70 (4). P. 57–61.

44. Bartknecht V. Gas, Vapor and Dust Explosions. Fundamentals, Prevention, Control. International Symposium on Grain Elevator Explosions, U. S. National Research Council (July 1978).

45. Rae D. Initiation of Weak Coal-Dust Explosions in Long Galleries and the Importance of the Time Dependence of the Explosion Pressure, Fourteenth Symposium

(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1973. P. 1225–1234.

46. Cybulski T. R. Coal Dust Explosions and Their Suppression, U. S. Department of Commerce NTIS, Springfield, Virginia, Translation TT73- 54001, 1975.

47. Richmond J. K., Liebman T., Bruszak A. E., Miller L. F. A Physical Description of Coal-Mine Explosions. Part II, Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1979. P. 1257–1268.

48. Richmond J. K., Liebman I. A Physical Description of Coal Mine Explosions, Fifteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1975. P. 115–126.

49. Pinkwass T. On the Ignition Capacity of Free-Falling Smouldering Fires. *Euromech Colloquium 208, Explosions in Industry*. 1986, April.

50. Lathrop J. K. Fifty-Four Killed in Two Grain Elevator Explosions. *Fire Journal*. 1978. 72 (5). P. 29–35.

51. Polikarpov A. D. Formation of an Air Shock Wave During Explosion of Sulphide Dust (translation from *Fiziko-Tekhnicheskie Probl. Raz. Pol. Zsk.*). New York: Plenum Publishing, 1984. P. 212–216.

52. Ryzhik A. B., Makhin V. S. Ignition of Methane / Air Suspensions of Coal Dust. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1978. № 14. P. 517–519.

53. Munck J. How to Avoid Fires and Explosions in Compressed Air Systems, *Power*, 1965. P. 82–83.

54. Siwek R. Preventive Protection against Explosions and Constructive Explosion Protection to Prevent Their Effects. *Euromech. Colloquium 208, Explosions in Industry, Gottingen, Federal Republic of Germany*. 1986.

55. Siwek R. Explosionsschutz in Apparaturen der chemisch-pharmazeutischen Industrie. *Pharmaceutical Industry*. 1987. № 49. P. 1165–1175.

56. Burgoyne J. H., Craven A. D. Fire and Explosion Hazards in Compressed Air Systems. *Loss Prevention*. 1973. № 7. P. 79–87.

57. Strehlow R. A. Accidental Explosions. *American Scientist*. 1980. № 68. P. 420–428.

58.Sutherland M. E., Wegert H. W. An Acetylene Decomposition Incident. *Loss Prevention*. 1973. № 7. P. 99–103.

59.Tesler L. A., Semyonov L. I. Peculiarities of Initiation and Propagation of Explosions in Grain Silos, Flour Mills, Feed Mills, and Related Security Problems. *Archivum Combustionis*. 1988. № 8. P. 33–41.

60.Torrent J. G., Fuchs J. C. Flammability and Explosion Propagation of Methane/Coal Dust Hybrid Mixtures. Proceedings of the 23rd International Conference of the Safe Mining Research Institute, Washington, DC, 1989.

61.Walls W. L. Just What is a BLEVE? *Fire Journal*. 1978. № 72 (6). P. 46.

62.Esparza E. D., Baker W. E. Measurements of Blast Waves From Bursting Frangible Spheres Pressurized with Flash-Evaporating Vapor or Liquid. *NASA Contractor Report 2811, Contract KSG-3008, National Aeronautics and Space Administration*. 1977.

63.Walker W. J. Venting: A Gap in Safety Practice. *Process Engineering*. 1982. P. 35–37.

64.Siewert R. D. Evacuation Areas for Transportation Accidents Involving Propellant Tank Pressure Bursts, NASA Technical Memorandum X-68277. 1972.

65.Strehlow R. A. Unconfined Vapor-Cloud Explosions – An Overview, Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1972. P. 1189–1200.

66.Davenport J. A. A Survey of Vapor Cloud Incidents, CEP 73 (9). 1977. P. 54–63.

67.Davenport J. A. A Study of Vapor Cloud Incidents, AIChE Loss Prevention Symposium, Houston, Texas, 1977.

68.Levis D. J. Unconfined Vapor Cloud Explosions: Definition of Source of Fuel. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1980. № 2. P. 121–126.

69.Brisco F., Shaw P. Spread and Evaporation of Liquid. *Prog. in Energy and Comb. Sci.* 1980. № 6, So, 2. P. 127–140.

70.Cox R. A. Methods of Predicting the Atmospheric Dispersion of Massive Releases of Flammable Vapor. *Prog, in Energy and Comb.* 1980. Sci. 6. № 2. P. 141–150.

71.Lewis D. J. Unconfined Vapor Cloud Explosions: Historical Perspective and Prediction Method Based on Incident Records. *Progress in Energy and Combustion Science.* 1980. № 2. P. 151–166.

72.Cave L. Risk Assessment for Vapor Cloud Explosions. *Prog. in Energy and Comb.* Sci. 1980. 63 № 2. P. 167–176.

73.Gugan K. Unconfined Vapor Cloud Explosions, The Institute of Chemical Engineering, Rigley Wark, England, 1978.

74.Parker R. J., Pope J-A., Davidson J. F., Simpson W. J. The Flixborough Disaster. Report of the Court of Inquiry, Her Majesty's Stationery Office, London, England, 1975.

75.Tucker D. M. The Explosion and Fire at Nypro (UK), Ltd., Flixborough, on 1 June 1974, Building Research Establishment, Fire Research Station, Borehamwood, Hertfordshire, England, 1975.

76.Tucker D. M. The Explosion and Fire at Nypro (UK), Ltd., Flix- borough, on 1 June 1974, Department of the Environment, Building Research Establishment Note N 60/76, Borehamwood, Hertfordshire, England, 1976.

77.NTSB Railroad Accident Report, Hazardous Materials Railroad Accident in the Alton and Southern Gateway Yard in East St. Louis, Illinois, January 22, 1972, NTSB-.RAR-73-1, Washington, D.C., 1973.

78.Strehlow R. A. Equivalent Explosive Yield of the Explosion in the Alton and Southern Gateway, East St. Louis, Illinois, January 22, 1972, AAE TR 73-3, Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1973.

79.NTSB Pipeline Accident Report, Phillips Pipe Line Company Propane Gas Explosion, Franklin County, Missouri, December 9, 1970. Report NTSB-PAR-72-1, Washington, D.C., 1972.

80. Burgess D. S., Zabetakis M. G. Detonation of a Flammable Cloud Following a Propane Pipeline Break: The December 9, 1970, Explosion in Port Hudson, Missouri, Report of Investigation 7752, U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C., 1973.

81. NTSB Highway Accident Report, Liquefied Oxygen Tank Explosion Followed by Fires in Brooklyn, New York, May 30, 1970. NTSB-HAR-71-6, Washington, D.C., 1971.

82. Office Of Pipeline Safety Griffith Indiana Butane Leak, Report No. OPS-PFR-74-1. 1974.

83. Gribbin J. This. Shaking Earth, Putnam, New York, 1978.

84. Anderson R. P., Armstrong D. R. Comparison Between Vapor Explosion Models and Recent Experimental Results, AIChE Symposium Series 138, Volume 70, Heat Transfer-Research and Design, 1974. P. 31–47.

85. Reid R. C. Superheated Liquids, American Scientist, 64. 1976. P. 146–156.

86. Witte L. C., Cox J. E., Bowier J. E. The-Vapor Explosion J. Metals, 22, 2, 1970. P. 39–44.

87. Witte L. C., Vyas T. J., Gelabert A. A. Heat Transfer and Fragmentation During Molten-Metal/Water Interactions. *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME*. 1973. P. 521–527.

88. Board S. J., Farmer C. L., Poole D. H. Fragmentation in Thermal Explosions, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1974. № 17. P. 331–339.

89. Ochiai M., Bankoff S. G. Liquid-Liquid Contact in Vapor Explosions, *Ind. Cont. on Fast Reactor Safety*, American Nuclear Society, Chicago, Illinois, 1976.

90. Board S. J., Hall R. W., Hall R. S. Detonation of Fuel-Coolant Explosions. *Nature*. 1975. № 254. P. 319–321.

91. Rabie R. L., Fowlen G. R., Fickett W. The Polymorphic Detonation. *Physics of Fluids*. 1979. № 22. P. 222–235.

92. Hall R. W., Board S. J. The Propagation of Large Scale Thermal Explosions. *Int. J. Heat and Mass Trans.* 1979. № 22. P. 1083–1093.



93. Пилюгин Л. П. Нагрузки, возникающие при взрывах газоздушных смесей в помещениях взрывоопасных производств. *Взрывобезопасность в строительстве: сб. трудов / МИСИ им. В. В. Куйбышева. М., 1983. 142 с.*

94. Румянцев В. С. Исследование нагрузок на конструкции здания от взрыва газоздушных смесей внутри помещения с учетом интенсификации горения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1977. 20 с.

95. Стрельчук Н. А., Иващенко П. Ф. Исследование нагрузок от взрыва газоздушных смесей в производственных помещениях. *Пожарная профилактика и тушение пожаров. М.: Стройиздат. 1966. 68 с. (Информ. сб. № 3).*

96. Стрельчук Н. А., Орлов Г. Г. Защита зданий взрывоопасных производств от нагрузок, возникающих при взрывном горении газоздушных смесей (ГВС). *Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.*

97. Стрельчук Н. А., Иващенко П. Ф., Румянцев В. С. К расчету легкобрасываемых конструкций для зданий взрывоопасных производств. *Промышленное строительство. 1975. № 1. С. 12–13.*

98. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М.: МГУ, 1957. 438 с.

99. Wall T. E, Phong-Anant D., Gumrajan V. S., et al. Indicators of Ignition for Clouds of 43. 1988. P. 392–397.

100. Bradley D., Mitcheson A. The Venting of Gaseous Explosion in Spherical Vessels. *Combustion and Flame. 1978. № 32. P. 221–236.*

101. Yao C. Explosion Venting of Leow – Strength. *Equipment and Structures Loss Prevention. 1974. V. 8. P. 1–9.*

102. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах: пер. с англ. М.: Мир. 1968. 592 с.

103. Мольков В. В., Некрасов В. П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения. *Физика горения и взрыва. 1981. Т. 18. № 4. С. 17–24.*

104. Бабкин В. С., Бабушок В. И. О начальной стадии горения газа в замкнутом объеме. *Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13. № 3. С. 24–29.*

105. Бабкин В. С., Бабушок В. И., Михайлова Л. Г. Влияние термодинамических и кинетических параметров на динамику сгорания газа в сферическом сосуде. *Физика горения и взрыва*. 1979. Т. 15. № 6. С. 14–20.
106. Мольков В. В., Некрасов В. П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения. *Физика горения и взрыва*. 1981. Т. 18. № 4. С. 17–24.
107. Gregory F. H. Analysis of the Loading and Response a Suppressive Shield When Subjected to an Internal Explosion, Minutes of the Seventeenth Explosive Safety Seminar, Denver, Colorado, 1976.
108. Zockoll C. Ziindwirksamkeit von Glimmnestern in StaubLuft-Gemischen. VDZ-Berichte [VDI-VerlagGmbH], Dusseldorf 701, 1989. P. 295–301.
109. Wiemann W. Influence of Temperature and Pressure on the Explosion Characteristics of Dust'Air and Dust / Air / Inert Gas Mixtures. *In Industrial Dust Explosions, ed. K. L. Cashdollar and M. Hertzberg. ASTM Special Technical Publication 958*. Philadelphia: ASTM, 1987. P. 202–216.
110. Kingery C. N., Schumacher R. N., Ewing W. O., Jr. Internal Pressures from Explosions in Suppressive Structures, BRL Interim Memorandum Report No. 403, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1975.
111. Пилюгин Л. П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М.: Стройиздат, 1988. 315 с.
112. Орлов Г. Г. Легкосбрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий. М.: Стройиздат, 1987. 198 с.
113. Пилюгин Л. П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2000. 224 с.
114. Пилюгин Л. П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов. М.: Пожнаука, 2010. 380 с.
115. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.

116. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов. Т. 1: учеб. пособ. для вузов. 13-е изд. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 560 с.
117. Aagaard B. T. Finite-Element Simulations of Earthquakes. PhD-Thesis, California Institute of Technology: Pasadena, California, 2000.
118. ANSYS, Inc.: ANSYS Structural Analysis Guide, ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA 2004.
119. Belytschko T., Chiapetta R. L., Bartel H. D. Efficient Large Scale Non-Linear Transient Analysis by Finite Elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1976. № 10. P. 579–596.
120. Hallquist J.O. LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation. California, USA, 2005.
121. Bakeer T. Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden, 2009.
122. Pozdieiev S., Myhalenko K., Nuianzin V., Zemlianskyi O., Kostenko T. Revealing patterns of the effective mechanical characteristics of cellular sheet polycarbonate for explosion venting panels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 1 (1-103). P. 32–39.
123. Sarva S. S., Boyce M. C. Mechanics of polycarbonate during high-rate tension. *J. Mech. Mater. Struct.* 2007. № 2. P. 1853–1880.
124. Pozdieiev S., Pidhoretskiy Yu., Nekora O., Sidnei S., Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. № 7 (4.3). P. 298–302. URL: [www.sciencepubco.com/index.php/IJET](http://www.sciencepubco.com/index.php/IJET).
125. Ніжник В., Добряк Д., Підгорецький Ю. Дослідження розкриття прорізів легкоскридних конструкцій зі стільникових полікарбонатних листів під дією вибуху. *Наукове видання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація : збірник наукових праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том. 4. № 1. С. 55–61.

126. Підгорецький Ю. Ю. Дослідження надійності спрацьовування легкоскидних конструкцій із стільниковими полікарбонатними листами методом кінцевих елементів. *Міжвідомчий збірник наукових праць. Геотехнічна механіка*. Дніпро, 2020. Вип. 152. С. 107–115.

127. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Pidhoretskiy Yu. Research of Disclosure of Relief Venting Structures with Polycarbonate Fencing in Conditions of Explosion. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1021 (2021) 012025. URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1021/1>.

128. Pidhoretskiy Yu. Research of the Actuation Reliability of Blast Relieve Systems with Honeycomb Polycarbonate Sheets. *The Scientific Heritage*. Hungary, Budapesht, 2020. Vol. 1. № 57 (57). С. 45–50.

129. Пат. на корисну модель 112879 Україна, МПК(2016.01) E06B 3/00, E06B 5/12 (2006.01), C04B 26/18 (2006.01). Легкоскидна огорожуюча віконна конструкція / Потетня К. В., заявник і патентовласник Потетня К. В. №u20161054316 ; заявл. 18.10.2016 ; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24, 2016 р.

130. Поздєєв С. В., Підгорецький Ю. Ю., Некора О. В. Дослідження поведінки легкоскидних конструкцій на основі гнучких прозорих матеріалів в умовах вибуху. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту»*: тези доповідей (Харків, 14 – 16 травня 2018 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 267

131. Поздєєв С. В., Ніжник В. В., Підгорецький Ю. Ю., Швиденко А. В. Чисельне дослідження несучої здатності дерев'яного перекриття в умовах пожежі. *Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті»*: тези доповідей (Харків, 18–20 листопада 2020 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 103.

132. . Підгорецький Ю. Ю. Проблематика нормативно-правового регулювання розрахунку проектних параметрів легкоскидних конструкцій в Україні. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 196.

## ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації  
та відомості про апробацію результатів дисертації

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Список основних публікацій здобувача:

1. Pozdieiev S., Pidhoretskiy Yu., Nekora O., Sidnei S., Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. № 7 (4.3). P. 298-302. URL: [www.sciencepubco.com/index.php/IJET](http://www.sciencepubco.com/index.php/IJET)

2. Ніжник В., Добряк Д., Підгорецький Ю. Дослідження розкриття прорізів легкоскридних конструкцій зі стільникових полікарбонатних листів під дією вибуху. *Наукове видання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Т. 4. № 1. С. 55–61.

3. Підгорецький Ю. Ю. Дослідження надійності спрацьовування легкоскридних конструкцій із стільниковими полікарбонатними листами методом кінцевих елементів. *Міжвідомчий збірник наукових праць. Геотехнічна механіка*. Дніпро, 2020. Вип. 152. С. 107–115.

4. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Pidhoretskiy Yu. Research of Disclosure of Relief Venting Structures with Polycarbonate Fencing in Conditions of Explosion. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1021. 012025. URL: <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1021/1>.

5. Pidhoretskiy Yu. Research of the Actuation Reliability of Blast Relieve Systems with Honeycomb Polycarbonate Sheets. *The Scientific Heritage*. Hungary, Budapesht. 2020. Vol. 1. № 57 (57). С. 45–50.

### Апробація матеріалів дисертації

1. Поздєєв С. В., Підгорецький Ю. Ю., Некора О. В. Дослідження поведінки легкоскридних конструкцій на основі гнучких прозорих матеріалів в умовах вибуху. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту»*: тези доповідей (Харків, 14 – 16 травня 2018 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 267.

2. Поздєєв С. В., Ніжник В. В., Підгорецький Ю. Ю., Швиденко А. В. Чисельне дослідження несучої здатності дерев'яного перекриття в умовах пожежі. *Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті»*: тези доповідей (Харків, 18–20 листопада 2020 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 103.

3. Підгорецький Ю. Ю. Проблематика нормативно-правового регулювання розрахунку проектних параметрів легкоскридних конструкцій в Україні. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 196.

## ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи





**ЦЕНТР  
ПОЖЕЖНО-ТЕХНІЧНОГО  
АУДИТУ**

03150, м. Київ, вул. Предславинська, буд. 43/2, тел./факс: +38 (044) 223-84-70, e-mail: info@ftc.com.ua, www.ftc.com.ua

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор ТОВ «Центр  
пожежно-технічного аудиту»

І.В. Ріпка



« 06 » 2021 року

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою  
«Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів  
безінерційних легкоскридних конструкцій за умов вибуху»

голова комісії – директор Ріпка Іван Вікторович;

Член комісії:

Заступник директора – Дюкарев Максим Володимирович

Комісія цим Актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи Підгорецького Юрія Юрійовича за темою: «Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів безінерційних легкоскридних конструкцій за умов вибуху» апробовані та впроваджені у розрахункову практику ТОВ «ЦЕНТР ПОЖЕЖНО-ТЕХНІЧНОГО АУДИТУ», шляхом використання результатів даної дисертаційної роботи під час проведення розрахунків щодо прогнозування поведінки світлопрозорих конструкцій в умовах надзвичайних ситуацій пов'язаних з вибухами та пожежами.

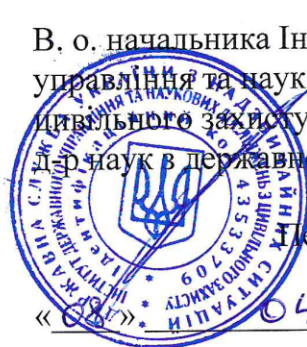
Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Член комісії:

Дюкарев М.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. начальника Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту  
Державного управління, професор



Петро ВОЛЯНСЬКИЙ

«04» 2021 року

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою  
«Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів  
безінерційних легкоскридних конструкцій за умов вибуху»

голова комісії – заступник начальника науково-випробувального центру – начальник відділу речовин і матеріалів канд. техн. наук, старший дослідник Добростан Олександр Васильович.

Члени комісії:

начальник відділу техногенної безпеки науково-дослідного центру цивільного захисту канд. техн. наук, Слущка Оксана Михайлівна;

провідний науковий співробітник відділу технічного регулювання науково-дослідного центру протипожежного захисту канд. економ. наук, доцент Корольова Олена Григорівна.

Комісія перевірила і цим Актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи Підгорецького Юрія Юрійовича за темою: «Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів безінерційних легкоскридних конструкцій за умов вибуху» впроваджено під час створення на пожежно-випробувальному полігоні експериментального стенду для визначення ефективних параметрів легкоскридних конструкцій.

Також отримані результати досліджень дисертації Підгорецького Ю.Ю. використано при розробці проекту державного стандарту України ДСТУ Х Х ХХ:20ХХ Пожежна безпека. Метод визначення параметрів легкоскридних конструкцій для вибухопожежонебезпечних приміщень та будинків.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Голова комісії:

Олександр ДОБРОСТАН

Члени комісії:

Оксана СЛУЦЬКА

Олена КОРОЛЬОВА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Черкаського інституту  
пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного  
захисту України

кандидат технічних наук, професор

генерал-майор служби цивільного захисту

Віктор ГВОЗДЬ

2021 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на тему «Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів безінерційних легкоскридних конструкцій за умов вибуху»

Розробник Юрій ПІДГОРЕЦЬКИЙ з однієї сторони та завідувачка кафедри пожежно-профілактичної роботи доктор технічних наук, професор Оксана КИРИЧЕНКО з іншої сторони, склали акт про те, що результати дисертаційної роботи на тему «Розрахунковий метод прогнозування поведінки гнучких прозорих елементів безінерційних легкоскридних конструкцій за умов вибуху» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу.

У дисертаційній роботі розроблено інженерний розрахунковий метод проектування безінерційних легкоскридних конструкцій із гнучкими огорожувальними елементами в умовах впливу надлишкового тиску вибуху, який дозволяє встановити мінімальні проектні розміри для забезпечення їх надійного спрацьовування. Це дає змогу уникнути матеріальних та трудових затрат при улаштуванні безінерційних ЛСК із гнучкими огорожувальними елементами із використанням розробленого методу як альтернативи безінерційних ЛСК із огорожувальним склінням, оскільки за умов використання першого типу ЛСК допускається повторне використання огорожувальних елементів, а також їх підбір під існуючі системи прозорого огороження будівель.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Пожежна безпека територій будівель і споруд» (протокол засідання кафедри № 11 від 04.06.2021 р.). Впровадження результатів забезпечує актуальний характер навчання та високий науково-методичний рівень викладання зазначених дисциплін і дозволяє підвищити якість проведення лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти.

Завідувач кафедри  
пожежно-профілактичної роботи

Оксана КИРИЧЕНКО

Розробник

Юрій ПІДГОРЕЦЬКИЙ



## ДОДАТОК В

Проект Державного стандарту України, в який впроваджені наукові результати  
дисертації

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

ДСТУ Х Х ХХ:20ХХ

**ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ  
ВИБУХОПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРИМІЩЕНЬ ТА БУДИНКІВ.**

*Видання офіційне*

(Проект, перша редакція)

Київ  
ДП «УкрНДНЦ»  
202\_

**ПЕРЕДМОВА**

1. РОЗРОБЛЕНО: Технічний комітет стандартизації «Пожежна безпека та протипожежна техніка (ТК 25)
  
- 2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від \_\_ \_\_\_\_\_ 202\_ р. № \_\_ з \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_ - \_\_\_\_
  
- 3 Цей стандарт розроблено згідно з правилами, установленими в національній стандартизації України
  
- 4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

Право власності на цей національний стандарт належить державі.  
Заборонено повністю чи частково видавати, відтворювати задля розповсюдження і розповсюджувати як офіційне видання цей національний стандарт або його частини на будь-яких носіях інформації без дозволу ДП «УкрНДНЦ» чи уповноваженої ним особи

ДП «УкрНДНЦ», 20\_\_\_\_

## ЗМІСТ

Зміст	С.
1 Сфера застосування.....	4
2 Нормативні посилання.....	5
3 Терміни та визначення понять.....	5
4 Позначки та скорочення.....	7
5 Загальні положення.....	9
7 Визначення необхідної площі ЛСК.....	10
8 Розрахунковий метод визначення мінімального конструктивного параметру, який забезпечить ефективне спрацювання ЛСК	16
Додаток А Експериментальний метод визначення тиску (обов'язковий) спрацювання ЛСК	19
Додаток Б Показники вибухопожежонебезпеки деяких (довідковий) речовин і матеріалів (довідниковий).....	29
Додаток В Розрахунок масової концентрації горючої (обов'язковий) речовини у горючому середовищі.....	34
Додаток Г Показники вибухопожежонебезпеки горючого (довідковий) пилу	35
Бібліографія	40