

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЛЕГКОСКИДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ СТІЛЬНИКОВИМИ ПОЛІКАРБОНАТНИМИ ЛИСТАМИ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Підгорецький Ю.Ю.

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОТОВЫМИ ПОЛИКАРБОНАТНЫМИ ЛИСТАМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

¹Подгорецкий Ю.Ю.

¹Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины

RESEARCH OF OPENING RELIABILITY OF BLAST EASILY DISPOSABLE SYSTEMS WITH HONEYCOMB POLYCARBONATE SHEETS BY FINITE ELEMENTS METHOD

¹Pidhoretskyi Yu.Yu.

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine

Анотація. У статті наведено результати математичного моделювання роботи легкоскидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів, що закріплені у стандартних віконних профілях, в умовах вибуху. Для відтворення впливу вибуху на дані легкоскидні конструкції був використаний підхід до моделювання динамічних систем, який використовує метод кінцевих елементів для апроксимації основних загальних рівнянь динаміки, доповнених рівняннями напружено-деформованого стану твердого тіла. Особливістю застосованого підходу є відтворення процесу впливу вибуху на легкоскидні конструкції такого типу за допомогою рівнянь, що описують рух динамічної системи із врахуванням контактної взаємодії із тертям стільникового полікарбонатного листа та відповідних поверхонь замків стандартного віконного профілю. При цьому відтворюється стільникова структура полікарбонатного листа за допомогою відповідних кінцевих елементів із врахуванням пружних властивостей полікарбонату. Для реалізації чисельних алгоритмів даного підходу використаний програмний код комп'ютерної системи LS-DYNA. Проведення чисельного експерименту щодо відтворення впливу вибуху на елементи легкоскидних конструкцій даного типу дозволило прослідкувати всі етапи деформування та руху стільникових полікарбонатних листів в умовах вибуху впритул до виходу їх країв із замків віконного профілю із вивченням відповідних параметрів напружено-деформованого стану. Із застосуванням такого підходу було досліджено надійність спрацювання легкоскидних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів і виявлені умову надійного їх розкриття з огляду на геометричні параметри прорізів легкоскидних конструкцій даного типу та товщину стільникових полікарбонатних листів. Проведені дослідження показали що деформування стільникових полікарбонатних листів відбувається надійно у діапазоні величин надлишкового тиску вибуху, що підтверджує ефективність застосування такого типу легкоскидних конструкцій для захисту від вибуху у приміщеннях будівель.

Ключові слова: легкоскидні конструкції, вибух, надійність розкриття, моделювання динамічних систем, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів.

Відповідно до чинних в нормах [1] приміщення вибухонебезпечних приміщень категорій А та Б повинні бути улаштовані захисними легкоскидними конструкціями (ЛСК). За вимогами стандартів необхідна площа ЛСК має визначатися розрахунковим чином. У якості перспективного конструктивного рішення ЛСК розглядається використання гнучких огорожувальних елементів, що встановлюються у стандартні віконні профілі з полівінілхлоридного полімерного матеріалу, оскільки вони можуть бути багатократно застосовані після їх видалення із рам під впливом вибуху.

Прикладом таких елементів можуть бути стільникові полікарбонатні листи (СПЛ). При запровадженні даної конструкції ЛСК мають бути вивчені основні закономірності їх поведінки в умовах вибуху, та визначені умови їх надійного спрацьовування.

У результаті проведеного аналізу досліджень показано, що гарантування безпеки щодо вибухів у приміщеннях промислових будівель із відповідними технологічними процесами, де обертаються вибухонебезпечні речовини, має важливе значення і потребує ефективних проектних та конструктивних рішень [2–4]. При запровадженні технічних рішень щодо захисту будівель та споруд від вибуху існує методика розрахунків вибухостійкості будинків при внутрішньому дефлаграційному вибуху газоповітряних сумішей [1]. Достатньо ефективну методику проектування ЛСК наведено у технічному кодексі встановленої практики, що є чинним у Республіці Білорусь ТКП 45-2.02-38-2006 (02250) [5], існують закордонні стандарти в даній області, наприклад, стандарт США NFPA 68 [6], стандарт Великобританії BSEN 14491:2012 [6], є також ряд монографій, публікацій, дисертацій [7] та ін., у яких розглянуто питання вибухозахисту приміщень вибухонебезпечних виробництв із застосуванням запобіжних конструкцій.

Метою даної статті є виявлення умов надійного спрацьовування легкоскридних конструкцій на основі стільникових полікарбонатних листів шляхом математичного моделювання їх поведінки в умовах вибуху за допомогою методу кінцевих елементів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

а) сформулювати основні положення щодо математичного описання поведінки СПЛ ЛСК в умовах вибуху;

б) створити методику математичного моделювання СПЛ ЛСК в умовах вибуху на основі наближення загальних диференціальних рівнянь динаміки та напружено-деформованого стану за допомогою методу кінцевих елементів та з використанням коду комп'ютерної системи LS-DYNA;

в) за результатами вивчити умови надійного спрацьовування ЛСК на основі СПЛ.

Для аналізу поведінки ЛСК на основі СПЛ використовується наближення загальних диференціальних рівнянь динаміки та напружено-деформованого стану за допомогою методу кінцевих елементів. При цьому дуже ефективним є використання коду комп'ютерної системи LS-DYNA при реалізації відповідних чисельних алгоритмів. Для описання процесу, що відбувається під час деформування СПЛ у замках стандартного віконного профілю використовуються відповідні математичні моделі. При цьому результатом такого чисельного експерименту може бути інформація щодо повного (часткового) розкриття ЛСК або їх нерозкриття. Відповідний математичний апарат дозволяє поставити завдання з урахуванням всіх особливостей деформування системи. При формулюванні задачі були застосовані такі основні припущення та посилання:

а) для моделювання процесу деформування СПЛ у стандартному віконному профілі застосовується метод кінцевих елементів у реалізації розрахунків за явним методом;

б) для реалізації розрахунків застосовані планарні кінцеві елементи (КЕ) за схемою Беличко - Цая [8], що включає інтегрування за товщиною по 5 внутрішнім точкам;

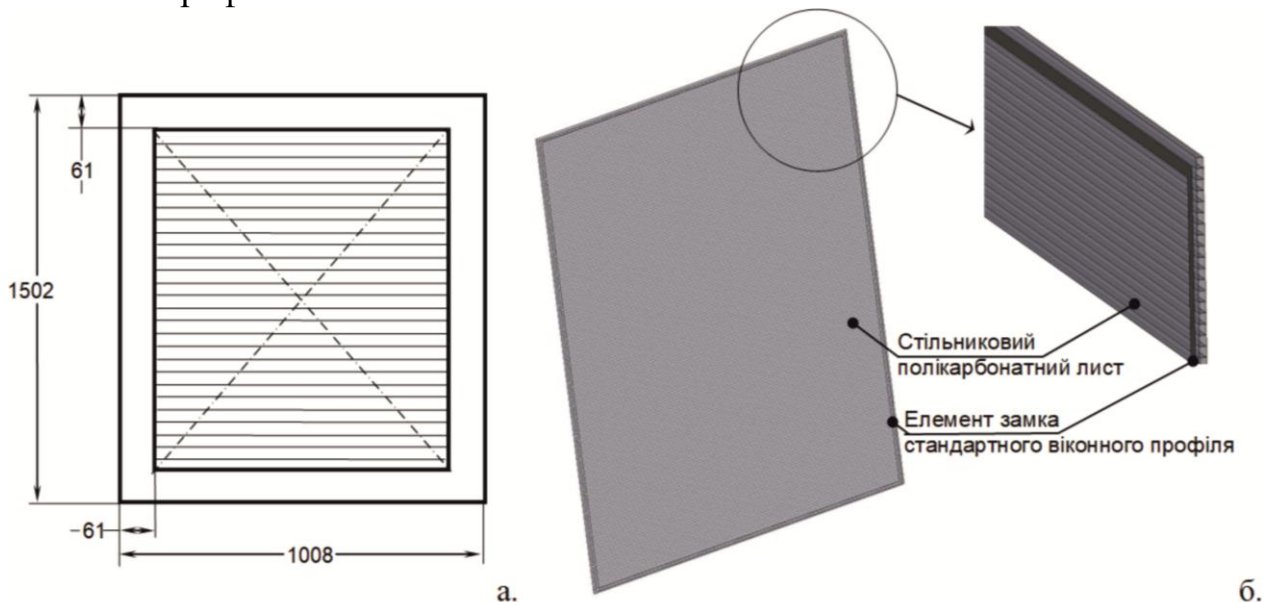
в) СПЛ моделюється як неоднорідна структура із відтворенням кожної перепонки, що відповідає їх реальним розмірам;

г) матеріал СПЛ є ізотропним нелінійно деформовним із двохлінійною діаграмою типу діаграми Прандтля;

д) при розв'язанні задачі має бути врахована геометрична та фізична нелінійність із наявними процесами тертя країв СПЛ у замках стандартного віконного профілю;

е) за критерій повного спрацювання ЛСК приймається повний вихід країв СПЛ за краї пластини, що моделює замки стандартного віконного профілю. Якщо відбувається частковий вихід, або виходу не відбувається – вважається, що ЛСК не спрацювала.

На рис. 1 наведено геометричну конфігурацію розрахункової області, яка включає СПЛ та узагальнену поверхню, що моделює замок стандартного віконного профілю.



а – геометрична схема; б – конструктивна схема.

Рисунок 1 – Геометрія розрахункової області для моделювання поведінки полікарбонатного стільникового листа в замках стандартного віконного профілю в умовах вибуху

На рисунку можна помітити, що геометрична модель складається з площин. Причому площини відображають розрахункову область поверхонь та стільників. Також на ньому відображено внутрішню поверхню замка стандартного профілю, оскільки саме вона сприймає основні навантаження і саме тут формуються основні сили тертя.

При проведенні розрахунків має бути врахована фізична нелінійність. У такому разі застосовується модель матеріалу, в основі якої лежить діаграма деформування. Діаграма деформування полікарбонату є типовою діаграмою деформування полімерів і має вигляд, наведений на рис. 2.

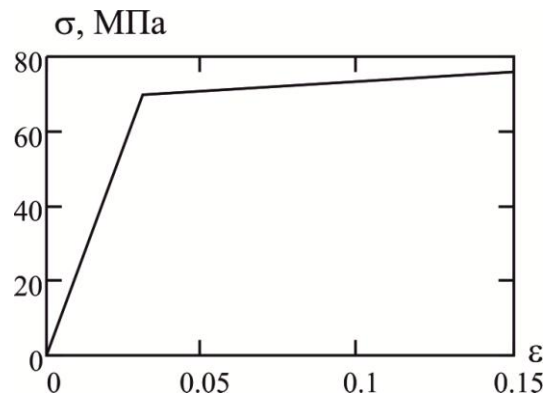


Рисунок 2 – Діаграма деформування полікарбонату.

Матеріал у пружній зоні деформується згідно із узагальненим законом Гука, за яким компоненти діватора напружень Коші визначається за виразом [8]:

$$s_{ij} = 2G\dot{\varepsilon}_{i,j}. \quad (1)$$

Настання пластичних деформацій фіксуються при виконанні умови фон Мізеса [8]:

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

де J_2 – другий інваріант тензору напружень.

Поточне напруження пластичності визначається за формулою:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_p \varepsilon_{eff}^p. \quad (3)$$

Ефективна пластична деформація визначається 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 визначається як:

$$E_p = \frac{EE_t}{E - E_t}, \quad (4)$$

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

Тиск на контактуючу поверхню визначається за виразом:

$$p = E_b \left(\frac{1}{V} - 1 \right), \quad (5)$$

де E_b – об'ємний модуль пружності; V – відносний об'єм.

У табл. 1 наведено основні параметри моделі механічних властивостей полікарбонату [9].

Таблиця 1 – Механічні характеристики полікарбонату

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, ν	Границя текучості, σ_0 , МПа
2271	50	3785	811.1	0.4	70

Для дослідження ЛСК на основі СПЛ прийнято навантаження, що відповідає найбільш використовуваному критерію надлишкового тиску, що дорівнює 5 кПа. Згідно із результатами досліджень, наведених у роботах [8], тиск при вибуху змінюється за кривою, наведеною на рис. 3.

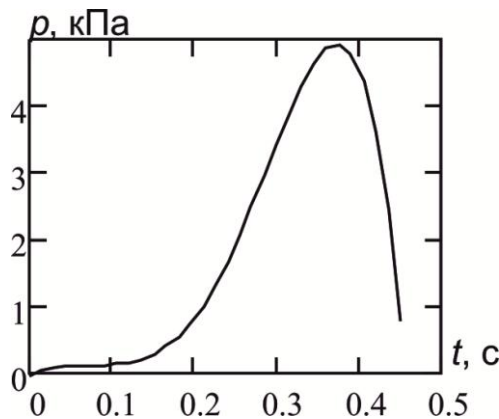


Рисунок 3 – Графік зміни тиску вибуху у залежності від часу із максимальним надлишковим тиском вибуху 5 кПа

При накладенні сітки з кінцевих елементів (КЕ) у силу специфіки побудованої геометричної області було вибрано відповідний тип КЕ – планарні оболонкові КЕ типу Беличко-Цая [8] з 5 точками інтегрування за товщиною. Геометричну форму та розрахункову схему КЕ наведено на рис. 4.

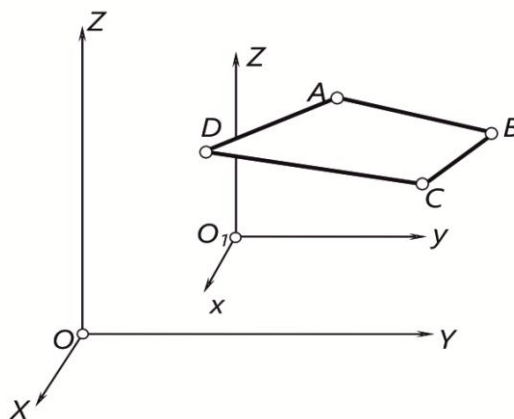


Рисунок 4 – Геометрична форма обраного типу кінцевого елемента.

Відповідно даному типу обраного кінцевого елемента було побудовано кінцево-елементну схему полікарбонатного стільникового листа у замку стандартного віконного профілю. Побудовану кінцево-елементну схему наведено на рис. 5.

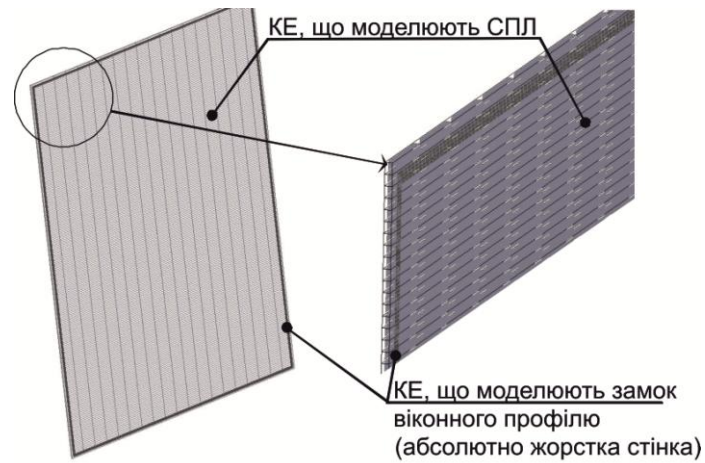


Рисунок 5 – Кінцево-елементна схема стільникового полікарбонатного листа разом із замком стандартного віконного профілю.

На даній схемі виділено кінцеві елементи, що мають різний тип матеріалу і належать різним частинам, для яких виконуються всі співвідношення та умови контакту. Важливою особливістю кінцево-елементної схеми є наявність другої частини, KE якої виділено темно-сірим кольором. Дана частина відтворює опірну поверхню замка стандартного віконного профілю, між якою та поверхнею СПЛ відбувається тертя. Дана частина являє собою абсолютно тверде тіло з повним блокуванням поступальних переміщень в будь-якому напрямку, так само як обертального руху в будь-якому напрямку.

Після проведення розрахунків було отримано дані щодо параметрів напружено-деформованого стану СПЛ товщиною 4 мм та його переміщення під час динамічного впливу вибуху. На рис. 6 наведено положення СПЛ товщиною 4 мм у різні моменти часу по відношенню до замка віконного профілю.

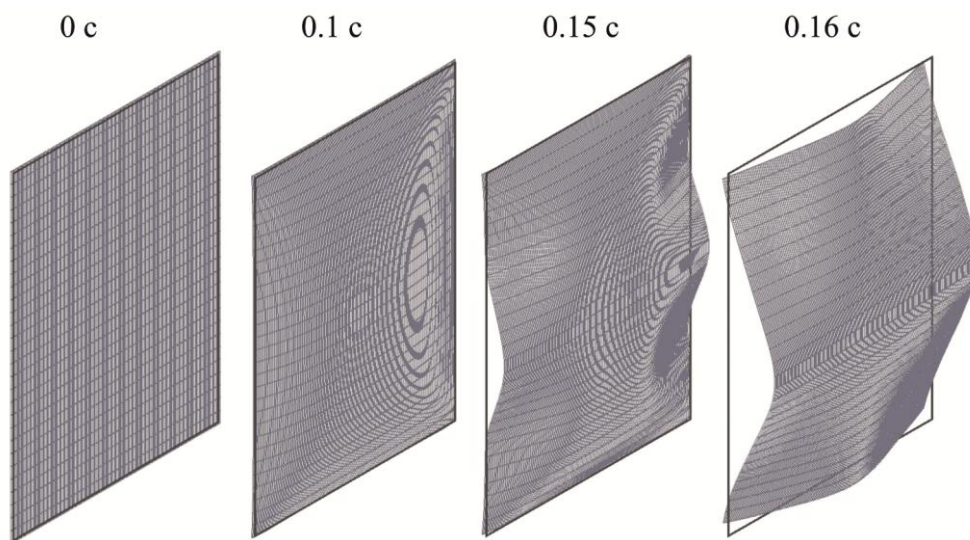


Рисунок 6 – Положення стільникового полікарбонатного листа товщиною 4 мм у різні моменти часу по відношенню до замка віконного профілю.

На рис. 7 наведено розподіли переміщень за напрямком, перпендикулярним до поверхні СПЛ товщиною 4 мм.

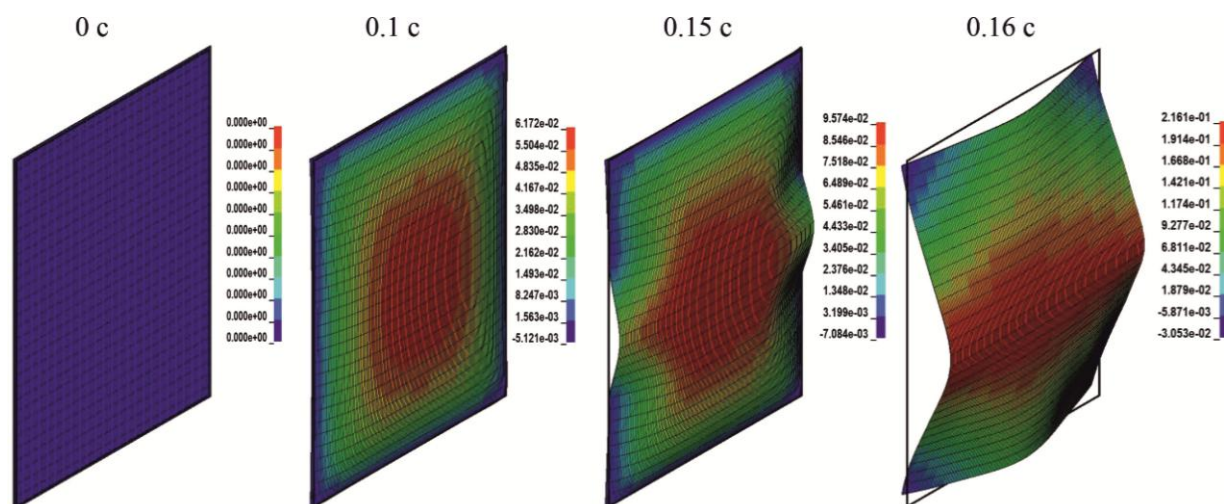


Рисунок 7 – Розподіли переміщень за напрямком, перпендикулярним до поверхні стільникового полі карбонатного листа товщиною 4 мм.

З рис. 6 та рис. 7 видно що повне відкриття СПЛ із замків віконного профілю відбувається у момент часу 0.16 с.

Аналогічні розрахунки було проведено для СПЛ 6 мм та 8 мм при мінімальних геометричних розмірах прорізу згідно із рис. 1. При проведенні даних розрахунків був прикладений тиск вибуху, який змінювався за залежностями від часу, що наведені на рис. 8.

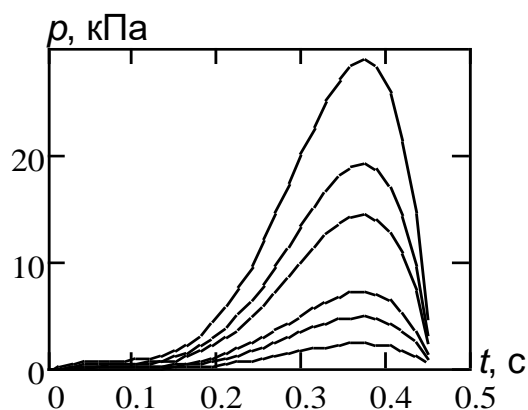


Рисунок 8 – Графік зміни тиску вибуху у залежності від часу із різними значеннями надлишкового тиску вибуху.

Кінцевим результатом розрахунку було визначення умов повного відкриття прорізу із СПЛ. У табл. 2 наведено дані щодо відносного проценту СПЛ, що повністю відкрилися.

Висновки. Дані, отримані у результаті розрахунку показали, що всі СПЛ із мінімальними розмірами прорізів повністю розкрилися, окрім одного випадку для СПЛ товщиною 8 мм для максимального надлишкового тиску 2.5 кПа. Це свідчить про адекватність розроблених математичних моделей та рекомендацій.

Таблиця 2 - Дані щодо відкриття стільникових полікарбонатних листів в умовах вибуху із мінімальними розмірами промів

Максимальний тиск вибуху, МПа						
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

Для гарантування нормального відкриття ЛСК із СПЛ можна рекомендувати не використовувати СПЛ товщиною 8 мм для ЛСК, що застосовується для захисту від надлишкового тиску вибуху не більше 2.5 кПа, або їх застосування має бути додатково обґрунтовано або за допомогою експерименту, або у результаті розрахунку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою (Український науково-дослідний інститут цивільного захисту УкрНДІЦЗ)
2. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Sidnei, S., Shchipets, S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602027>.
3. Nekora, O., Slovynsky, V., Pozdieiev, S. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024>.
4. Пиліюгин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М.: Стройиздат, 1988. 315 с.
5. ТКП 45-2.02-38-2006 (02250). Конструкции легкосбрасываемые. Правила расчета. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. 27 с.
6. NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2013 Edition.
7. BS EN 14491:2012. Dust Explosion Venting Protective Systems.
8. Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA 2005.
9. Sarva, S.S.; Boyce, M.C. Mechanics of polycarbonate during high-rate tension. J. Mech. Mater. Struct. 2007, 2, 1853–1880. <https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.1853>

REFERENCES

1. Ukrainian Research Institute of Civil Defense UkrRICD (2016), DSTU B. V.1.1-36:2016 Vyznachennia kategoriy prymyshchen, budynkiv, ustanovok za vybukhopozhezhnoyu ta pozhezhnoyu nebezpekoyu [DSTU B. V.1.1-36:2016 Category definition of chambers, buildings, installations corresponding blast and fire dangers], Kyiv, UA.
2. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Sidnei, S. and Shchipets, S. (2017), "Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations", MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602027>
3. Nekora, O., Slovynsky, V. and Pozdieiev, S. (2017), "The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method", MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024>
4. Pilyugin L.P. (1988), *Konstruksii sooruzheniy vzryvoopasnykh proizvodstv* [Building structures of blast danger facilities], Sroyizdat, Moscow, SU.
5. Architect and Building Ministry of Belarus Republic (2006), *ТКП 45-2.02-38-2006 (02250) Konstruksii legkosbrasyvaemye. Pravila rascheta* [TKP 45-2.02-38-2006 (02250). Blast relieve systems. Calculating rules], Minsk, Belarus.
6. NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2013 Edition.
7. BS EN 14491:2012. Dust Explosion Venting Protective Systems.
8. Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA 2005.
9. Sarva, S.S. and Boyce, M.C. (2007), "Mechanics of polycarbonate during high-rate tension", J. Mech. Mater. Struct, 2007, 2, 1853–1880. <https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.1853>

Про автора

Підгорецький Юрій Юрійович, ад'юнкт Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна, j.kovalova@shieldlaw.com.ua.

About the author

Pidhoretsky Yuriy Yuriyevich, Adjunct of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National university of civil protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine, j.kovalova@shieldlaw.com.ua.

Аннотация. В статье приведены результаты математического моделирования работы легкобрасываемых конструкций на основе сотовых поликарбонатных листов, закрепленных в стандартных оконных профилях, в условиях взрыва. Для воспроизведения влияния взрыва на данные легкобрасываемые конструкции был использован подход к моделированию динамических систем, который использует метод конечных элементов для аппроксимации основных общих уравнений динамики, дополненных уравнениями напряженно-деформированного состояния твердого тела. Особенностью примененного подхода являются воспроизведения процесса влияния взрыва на легкобрасываемые конструкции такого типа с помощью уравнений, которые описывают движение динамической системы с учетом контактного взаимодействия с трением сотовых поликарбонатных листов и соответствующих поверхностей замков стандартного оконного профиля. При этом моделируется сотовая структура поликарбонатного листа с помощью соответствующих конечных элементов с учетом упругих свойств поликарбоната. Для реализации численных алгоритмов данного подхода использован программный код компьютерной системы LS-DYNA. Проведение численного эксперимента по воспроизведению влияния взрыва на элементы легкобрасываемых конструкций данного типа позволило проследить все этапы деформирования и движения сотовых поликарбонатных листов в условиях взрыва вплоть до выхода их краев из замков оконного профиля с изучением соответствующих параметров напряженно-деформированного состояния. С применением такого подхода была исследована надежность срабатывания легкобрасываемых конструкций на основе сотовых поликарбонатных листов и выявлены условия их надежного раскрытия с учетом геометрических параметров проемов легкобрасываемых конструкций данного типа и толщину сотовых поликарбонатных листов. Проведенные исследования показали, что раскрытие сотовых поликарбонатных листов происходит надежно в диапазоне величин избыточного давления взрыва, что подтверждает эффективность применения такого типа легкобрасываемых конструкций для защиты от взрыва помещений зданий.

Ключевые слова: легкобрасываемые конструкции, взрыв, надежность раскрытия, моделирование динамических систем, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

Annotation. In the article, the author presents results of mathematical modeling of operation of the venting relief structures made of honeycomb polycarbonate sheets and fixed in the standard window profiles, under the effect of explosion. In order to reproduce the explosion effect on venting relief structures, an approach to modeling dynamic systems was applied, which used a finite element method to approximate the basic general equations of dynamics added by the equations of the stress-strain state of a solid body. The applied approach differs by reproduction of the explosion process impact on the venting relief structures of this type by using equations which describe the motion of the dynamic system with accounting a contact interaction with the friction of honeycomb polycarbonate sheets and corresponding surfaces of the standard window profile locks. The honeycomb structure of the polycarbonate sheet was modeled by appropriate finite elements with considering the polycarbonate elastic properties. In order to implement numerical algorithms of this approach, a program code of the LS-DYNA computer system was used. The conducted numerical experiment on reproducing the explosion effect on the relief elements of this type of the venting relief structures made it possible to trace all stages of the honeycomb polycarbonate sheets deforming and moving under the action of explosion up to the exit of their edges from the window profile locks with the study of the corresponding stress-strain state parameters. By using this approach, reliably disclosure of the venting relief structures based on honeycomb polycarbonate sheets was investigated, and conditions for their reliable disclosure were identified with considering geometrical parameters of such type of venting relief structures opening and thickness of the honeycomb polycarbonate sheets. Results of the research have shown that reliable disclosure of the honeycomb polycarbonate sheets occurs within the range of the explosion overpressure, hence, confirming the effectiveness of such type of the venting relief structures used for protecting buildings against the explosion action.

Keywords venting relief structures, honeycomb polycarbonate sheets, explosion, reliability of disclosure, modeling of dynamic systems, stress-strain state, finite element method.

Keywords: easily disposable structures, explosion, reliability of disclosure, modeling of dynamic systems, stress-strain state, finite element method.

Стаття надійшла до редакції 19.06. 2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.П. Мінєєвим