

УДК 62-4 + 62-98 + 62-94 : 692

СТІЙКІСТЬ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО ВПЛИВУ ВИБУХУ БОЄПРИПАСУ. ОГЛЯД МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОКРЕМИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Басок Б.І.^{1,2}, член-кореспондент НАН України, Недбайло О.М.^{1,2}, докт. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03680²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.8>

В роботі аналізується потенціал числового моделювання руйнівного впливу вибухів з точки зору його застосування до огорожувальних конструкцій (в т.ч. світлопрозорих). Для найбільш розповсюджених методів подано теоретичну основу із вимогами, реалізацією та відповідними прикладами результатів. Крім того наведено інтерпретацію вимірювань. Представлені окремі спрощені математичні моделі, базові схеми дискретизації отриманих значень визначальних величин та результати розрахунків у поєднанні зі скороченими описами основних параметрів матеріалів огорожувальних конструкцій.

The paper analyzes the potential of numerical modeling of the destructive impact of explosions from the point of view of its application to enclosing structures (including translucent ones). For the most common methods, a brief comprehensive theoretical basis with requirements, implementation and corresponding examples of results is given. In addition, the interpretation of the measurements is given. Separate simplified mathematical models, basic discretization schemes of the obtained values of the determining variables and calculation results are presented in combination with abbreviated descriptions of the main parameters of the materials of the fencing structures.

Бібл. 27, рис. 7., табл. 1.

Ключові слова: вибух, детонація, вибухова хвиля, вибухове навантаження, огорожувальна світлопрозора конструкція, деформація структурних елементів, напруження.

E_m – питома внутрішня енергія вибухової речовини, Дж;
 $A, A', A'', B, R, R_2, \lambda_1, \lambda_2, \omega$ – параметри моделі матеріалу;
 P – тиск, Па;
 P_{so} – піковий надлишковий тиск, Па;
 R – відстань від джерела детонації до навантаженої (в т.ч. світлопрозорої) конструкції, м;
 t – час, с;
 t_0 – тривалість позитивної фази, с;
 W – маса заряду вибухівки (в тротилловому еквіваленті), кг;
 Z – масштабована відстань, м/кг^{1/3};

α – константа;
 ρ – густина продуктів вибуху, кг/м³;
 ρ_0 – початкова густина твердої вибухової речовини, кг/м³;
 EOS (Equation Of State) – рівняння стану;
 FEM (Finite Element Method) – метод кінцевих елементів;
 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) – метод гідродинаміки згладжених частинок;
 JWL (Jones-Wilkins-Lee) – рівняння стану (модель) Джонса-Вілкінса-Лі.

Постановка проблеми

В умовах дії воєнного стану в Україні важливим є технічний захист об'єктів критичної та соціальної інфраструктури, а також житлового фонду від пошкоджень і руйнувань внаслідок навмисних воєнних ударів, актів тероризму, злочинної діяльності тощо. Під час відбудови житлово-комунального господарства в повоєнний час нагальним має бути врахування вимог щодо підвищення норм безпеки для осіб, які перебувають у приміщеннях різного призначення. Чинні нормативні акти з проектування в будівництві зазвичай обмежуються використанням в сейсмоактивних зонах і не враховують відповідні загрози, що актуальні для воєнних дій і випадків тероризму. Запровадження обґрунтованих змін у регуляторній документації має підтримувати стійкість будівель та інфраструктури до вибухових інцидентів.

Для розроблення заходів щодо захисту об'єктів житлово-комунального господарства та інфраструктури від руйнівного впливу ударних хвиль від вибухів потрібні методи кількісної оцінки стійкості елементів конструкції до ударного навантаження та рівня небез-

пеки, що виникає внаслідок руйнування конструкцій. Сучасними підходами до досліджень у цьому напрямі є числові методи розрахунку параметрів механічних напружень в огорожувальних (в т.ч. світлопрозорих) конструкціях або натурні випробування (експерименти).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Експериментальні методи використовуються у дослідженнях структурної реакції будівельних елементів. Вплив детонації на великій відстані (вибухове навантаження) можна проаналізувати за допомогою випробувань ударною трубою (Wei J, Dharani L., 2006) [1] або за допомогою детонаційних експериментів (Kingery C.N., Bulmash G., 1984) [2]. При цьому розрізняються різні сценарії навантаження, оскільки для конструкції можуть виникнути руйнівні наслідки та мати місце різні пошкодження. Контактні детонації характеризуються високим тиском, що навантажує структуру лише на мікросекунди. Вплив на структуру є локальним. Активується руйнування при зсуві та продавлюванні, що, залежно від міцності та пластичності навантаженого матеріалу, призводить до фрагментації як з боку навантаження, так і з тильної сторони конструкції. Вибухове навантаження призводить до навантаження повної або значної площі конструкції. Це призводить до глобальної структурної реакції, наприклад до пошкодження через вигин. В роботі (Gebben, N., Döge, N. and Hübner, M., 2012) [3] зазначено, що в динамічному навантаженні елементів конструкції бризантними вибуховими речовинами домінують саме маса заряду та відстань між джерелом детонації та елементом впливу.

На рис. 1 представлено історію тиску в часі випробування елемента скління ударною трубою [3]. Крім сильного імпульсу на початку, що характеризується

фронтом ударної хвилі, видно декілька відбиттів, але зі значно меншою амплітудою. Ці збурення виникають внаслідок відбиття хвилі навантаження в ударній трубі та являють собою комплексне вибухове навантаження. Такий сценарій має місце, якщо вибухова хвиля відбивається більш ніж однією перешкодою в оточенні досліджуваної споруди.

На рис. 2 наведено, розтягнуту за віссю абсцис, залежність тиску в часі за початковими даними рис. 1. Максимальне значення шкали часу при цьому становить 70 мс, що набагато менше, ніж на рис. 1. При цьому репрезентуються типові характеристики ударної хвилі. Вибухове навантаження характеризується через ударний фронт на початку навантаження з подальшим експоненціальним спаданням у позитивній фазі, за якою слідує негативна фаза. Високочастотні коливання, показані в динаміці тиску від часу, є наслідком високої власної частоти коливань датчика тиску, що використовувався. Крім того, обрана відповідна висока частота дискретизації значень для отримання високоточних результатів [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Для цілей сертифікації характеристик віконних конструкцій зазвичай потрібен сценарій навантаження, який включає значення щодо тиску відбиття та імпульсу під час тривалості позитивної фази. Що стосується випробування, це означає, що бажані значення щодо показників міцності за відсутності руйнувань світлопрозорої конструкції повинні бути перевищені для зразка в місці його розташування.

Числовий аналіз можна використовувати для прогнозування поведінки скла під впливом вибухової

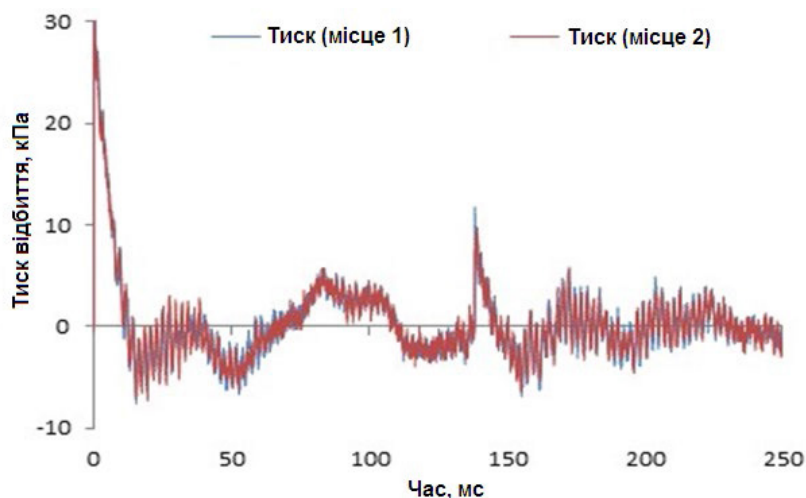


Рис. 1. Значення тиску, що виміряні на поверхні склопакету впродовж тривалості експерименту

хвилі. Це числове моделювання не може замінити експериментальні випробування, але їх можна використовувати при плануванні випробувань, для прогнозування експериментальних результатів і проведення параметричних досліджень шляхом зміни, наприклад, граничних умов, геометрії структури, властивостей матеріалу та даних про вибухові речовини (Larcher M., Solomos G., Casadei F., Gebbeken N., 2012) [4].

Результати розрахунків та вимірювань значень тиску на тестовій поверхні огорожувальної конструкції

Слід зазначити, що тиск на поверхні зразка може суттєво змінюватись залежно від параметрів навантаження, конструкції ударної труби, площинності фронту удару, розташування та геометрії зразка (x - y) (рис. 3, (Riedel, W. та ін., 2010) [5]). Однак зазвичай немає вимог щодо точного місця вимірювання тиску. Крім

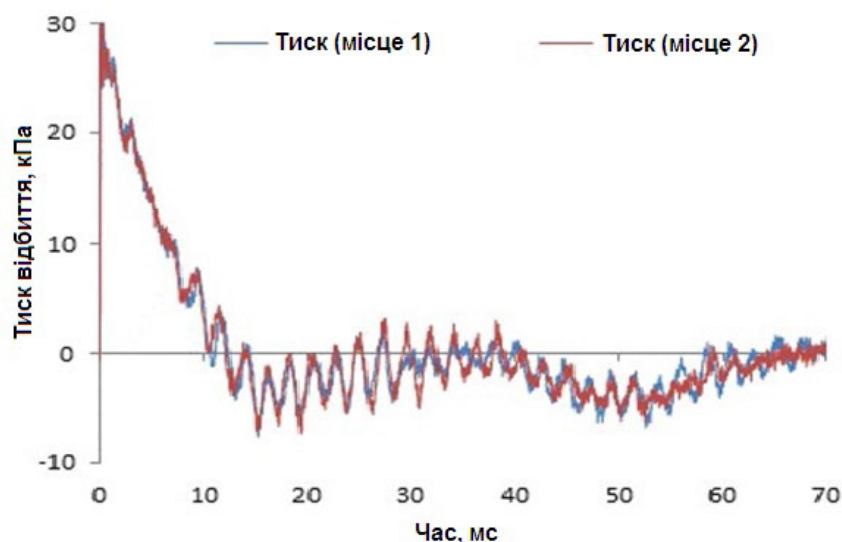


Рис. 2. Фрагмент зміни тиску, що виміряні впродовж часу на поверхні склопакету

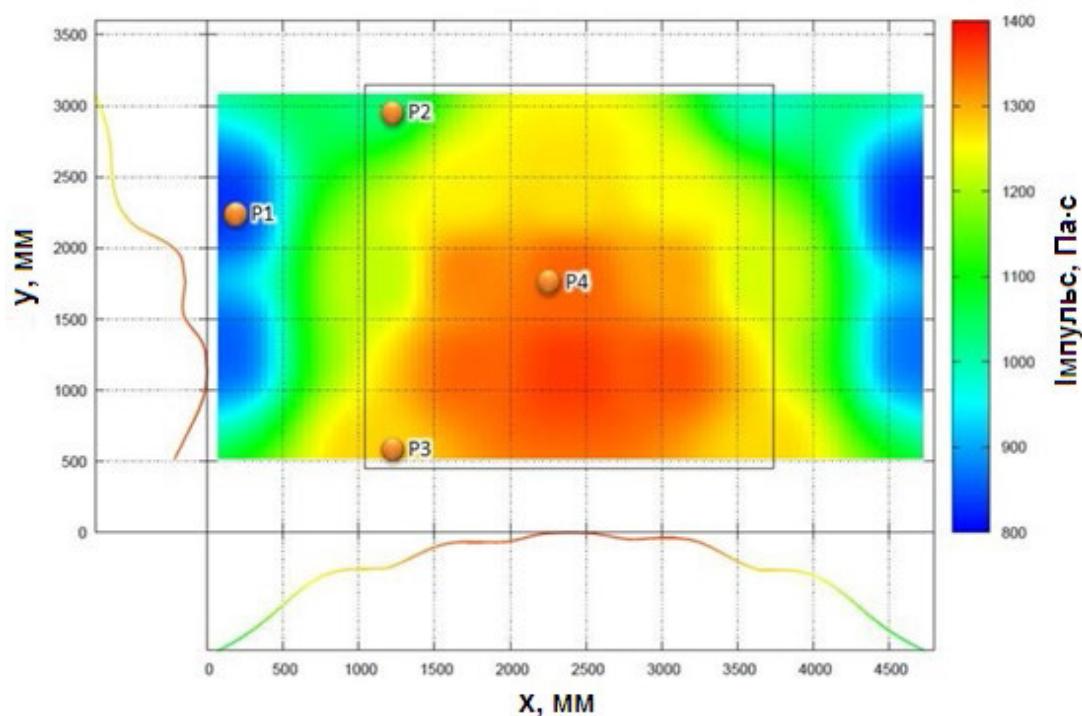


Рис. 3. Розподіл тиску на тестовій поверхні залізобетонної конструкції

того, у більшості випадків немає визначення того, чи має перевищувати вказане значення середній тиск на поверхні чи піковий тиск.

Якщо об'єкт дослідження прикріплений до кінця ударної труби, градієнти тиску та імпульсу будуть менш значущими, ніж у разі розміщення всередині труби. Імпульси тиску, що впливають на центральну частину конструкції, тривають довше, тоді як імпульси, що впливають на об'єкт біля його вільних країв, мають найкоротшу тривалість. Тому розмір усієї тестової установки порівняно із зразком має велике значення: у випадку, якщо зразок прикріплено до кінця труби, установку можна порівняти з нескінченно великим фасадом будівлі. Це гарантує, що навантаження під час випробувань перевищують навантаження в реальних конструкціях. Однак, якщо через розмір зразка необхідно провести випробування у великому симуляторі вибуху та прикріпити зразок до жорсткої конструкції, розмір зони навколо нього стає критично значущим (рис. 4, дані з рис. 3) [5].

При цьому, також критичною є власна частота (або основний період) коливань поверхні зразка. Якщо час реакції зразка менший, ніж фаза надлишкового тиску, необхідно переконатися, що тиск не зменшується занадто сильно до досягнення максимальної деформації, тому що в іншому випадку зразок може бути навантажений недостатньо, навіть за створення необхідного значення тиску (overpressure) від ударної хвилі.

Використання числового моделювання для досліджень руйнування конструкцій під впливом ударної хвилі

Неявне та явне інтегрування часу є двома основними доступними методами, що використовуються в аналізі кінцевих елементів. Ці методи мають різні процедури інтегрування за часом. Неявний метод є безумовно стійким. Це означає, що точність розв'язку не залежить від величини кроку в часі. Великі прирости часу можна використовувати під час аналізу, і, отже, витрати на обчислення можуть бути значно зменшені, особливо коли проблема є лінійною. Єдина умова полягає в тому, що приріст часу має бути достатньо малим, щоб зафіксувати зміну навантаження в часі (*Johnson, G.R., Holmquist, T.J., 1993*) [6].

У лінійному аналізі (лінійна поведінка матеріалу, відсутність контакту, невелика деформація тощо) розв'язок для невідомих змінних (наприклад, компонентів переміщення у вузлах) можна отримати безпосередньо з відомих змінних, встановлених на попередньому кроці часу. Немає ітераційного процесу, а чисельна процедура дуже ефективна.

Для нелінійного аналізу з еластичними та пластичними матеріалами, моделями пошкоджених матеріалів і контактами тощо необхідна ітераційна процедура для отримання точного рішення. У цьому випадку необхідний критерій збіжності. Для таких нелінійних задач витрати на обчислення значно зростають. У деяких конфігураціях, коли приріст часу занадто великий, критерій збіжності не може бути задоволений, і приріст часу потрібно зменшити, щоб отримати збіжність ітераційної процедури (таблиця 1).

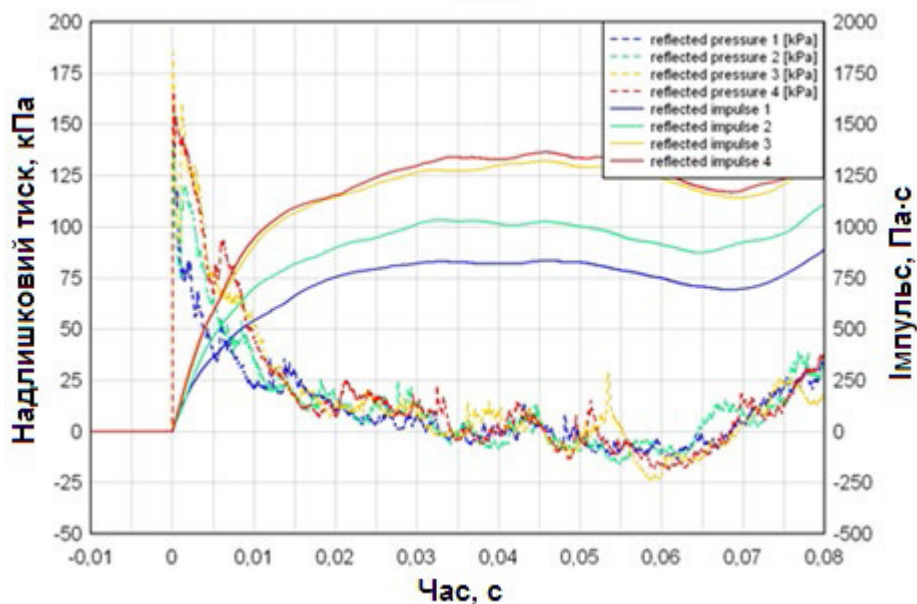


Рис. 4. Зміна відбитого тиску на тестовій поверхні залізобетонної конструкції в часі (дані з рис. 3)

Табл. 1. Список кодів FEM з їх способами інтегрування в часі та можливостями розв'язувача

Програмне забезпечення	Неявний метод	Явний метод	Розв'язувачі			
			Лагранж	Ейлер	Ейлер/Лагранж	Інші
Комерційне програмне забезпечення						
ABAQUS (Dassault Systems)	X	X	X	X	X	SPH
ANSYS (ANSYS)	X	X	X			
AUTODYN (ANSYS)		X	X	X	X	SPH
COMSOL (Comsol)	X	X				
IMPETUS (Impetus)		X	X			SPH
LS-DYNA (LSTC)	X	X	X	X	X	SPH
NASTRAN (MSC)	X	X	X			
PAM CRASH (ESI)	X	X	X			
RADIOSS (Altair Engineering)	X	X	X			
Відкрите програмне забезпечення						
ASTER (EDF)	X		X			
CASTEM (CEA)	X	X	X			
EUROPLEXUS (CEA + JRC)		X	X	X	X	
OURANOS (CEA)	X	X	X	X	X	
SOPHIA (EMI)		X	X			

Для сильно нелінійних задач збіжність ітераційної процедури не може бути досягнута, і моделювання припиняється. У цих випадках обчислювальна вартість стає дуже високою, і вибір явної процедури може бути вигідним і доречним (*Du Bois P., Kolling S., Fassnacht W., 2003*) [7].

Аналіз Ейлера є ефективним для застосувань, що включають екстремальну деформацію, включно з потоком рідини. У цих додатках традиційні елементи Лагранжа будуть сильно спотворені та втратять точність. Розбризкування рідини, потік газу та більшість проблем проникнення можна ефективно вирішити за допомогою аналізу Ейлера.

У схемі Ейлера процедура інтегрування за часом є переважно явною. Недоліком підходу Ейлера є можливість мати кілька матеріалів в одній комірці сітки. Це призводить до більш складних чисельних правил для оцінки тиску, густини та інших змінних, коли сітка містить декілька матеріалів із різними моделями, де розташування та рух контактних поверхонь між матеріалами не просто відстежити. Крім того, фаза транспортування породжує деякі додаткові похибки в чисельних розрахунках.

Щоб підвищити якість чисельного підходу багатьох сучасних кодів включають поєднаний аналіз Ейлера-Лагранжа. У цьому випадку просторова область

розділяється на дві частини. Одна частина присвячена аналізу Лагранжа, а друга частина збережена для підходу Ейлера. Цей об'єднаний підхід дуже корисний для моделювання за один цикл поширення ударної хвилі та реакції конструкції. Ейлерово-Лагранжеві поєднання дозволяють комбінувати матеріали Ейлера з традиційним нелінійним аналізом Лагранжа.

У традиційному аналізі Лагранжа вузли фіксуються всередині матеріалу, а елементи деформуються в міру деформації матеріалу. Елементи Лагранжа завжди на 100 % заповнені одним матеріалом, так що межа матеріалу збігається з межею елемента. У Ейлеровому аналізі вузли фіксуються в просторі, а потоки матеріалу проходять через елементи, які не деформують сітку. Ейлерові елементи не завжди можуть бути наповнені матеріалом на 100 % і багато з них можуть бути частково або повністю порожніми, а один елемент Ейлера може містити суміш кількох матеріалів. Границя матеріалу в Ейлеровій сітці повинна обчислюватися на кожному кроці часу. Ейлерова сітка, як правило, є простою прямокутною сіткою елементів, побудованих так, що виходять далеко за межі Ейлерових матеріалів, надаючи матеріалу простір для переміщення та деформації.

Зіставлення результатів розрахунків та вимірювань значень тиску на поверхні огорожувальної конструкції

Поведінку рідин та газів можна моделювати за допомогою рівнянь стану; вони включають модель ідеального газу, що використовується для повітря, і модель Джонса-Вілкінса-Лі (JWL), що використовується для вибухового матеріалу.

Нові методи з'являються в області моделювання високої швидкості/деформації. Одним із них є метод гідродинаміки згладжених частинок (SPH). SPH – це чисельний метод, який є частиною великої сімейства безсіткових методів. Для цих методів немає необхідності визначати вузли та елементи, як це зазвичай робиться в аналізі кінцевих елементів. Необхідно визначити сукупність точок, що представляють дане тіло. У SPH ці точки зазвичай називають частинками або псевдочастинками. SPH – це повністю лагранжева схема моделювання, що дозволяє дискретизувати заданий набір рівнянь континууму шляхом інтерполяції властивостей безпосередньо в дискретному наборі точок, розподілених по області рішення, без необхідності визначення просторової сітки. Розв'язувач Лагранжа в поєднанні з відсутністю фіксованої сітки дозволяє розв'язувати проблеми, що пов'язані з потоком рідини та структурною взаємодією, що включає великі деформації, руйнування та розрив конструкції. Приклад отриманих результатів [7] отриманий за методикою Dassault Systemes [8] наведено на рис. 5.

Математичне моделювання детонаційних та ударних хвиль

Актуальною є гідродинамічна модель середовища, в якій об'ємна міцність матеріалу визначається рівнянням його стану (EOS). Ця модель визначає зміну тиску як функцію густини середовища та питомої енергії. Розповсюджене застосування набуло поєднання рівнянь стану ідеального газу (EOS) та Джонса-Вілкінса-Лі (JWL) для визначення тиску після вибуху. Рівняння стану Джонса-Вілкінса-Лі (JWL) моделює тиск, що створюється в процесі вибуху, як функцію густини продуктів вибуху. Ця модель реалізована в режимі прогнозованого спалювання, де координати місця детонації та час вибуху вказується як початкова умова. Детонаційна ударна хвиля поширюється від точки виникнення із заданою швидкістю детонаційної хвилі.

Після того як матеріальна точка детонує, вона починає розширюватися відповідно до рівняння моделі стану. Рівняння стану за моделлю JWL

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \exp \left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \exp \left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \omega \rho E_m \quad (1)$$

де p – тиск, Па; ρ – щільність продуктів вибуху, кг/м³; ρ_0 – початкова щільність твердої вибухової речовини, кг/м³; E_m – питома внутрішня енергія вибухової речовини, Дж; A, B, R_1, R_2 та ω – параметри моделі матеріалу, що визначаються експериментально для кожного типу вибухової речовини.

Значення цих параметрів зазначені в (Dobratz та ін., 1985) [10]. Поведінка моделі JWL (1) від співвідношення тиску до об'ємного розширення ($V/V_0 = \rho_0/\rho$) з використанням типових параметрів вибухівки показано на рис. 6, де також зображені три складові, що вносять свій внесок. У початковій фазі вибуху домінує перший член, а в кінцевій фазі модель вироджується до моделі ідеального газу, що описується третім членом.

Іншою моделлю, що використовується для обчислення максимального позитивного тиску P_s , є модифіковане рівняння Фрідлендера (Kinney G.F, Graham K.J., 1985) [11], що є квазіекспоненціальним наближенням позитивної фази форми хвилі з урахуванням тиску довкілля

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) e^{-\alpha \frac{t}{t_0}} \quad (2)$$

де t_0 – тривалість позитивної фази, с; t – час прибуття фронту вибухової хвилі, с; α – константа, а P_{so} – піковий надлишковий тиск, Па.

Піковий надлишковий тиск, враховуючи тиск навколишнього середовища p_o , можна розрахувати за допомогою емпіричної формули

$$P_{so} = p_o \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (3)$$

де Z – масштабована відстань, м/кг^{1/3}.

Параметри вибухової хвилі зазвичай будуються як функції масштабованої відстані Гопкінсона. Ці параметри базуються на емпірично визначених рівняннях. Їх не слід екстраполювати за межі діапазонів, наведених у літературі. Час прибуття фронту хвилі до місця впливу на поверхню можна розрахувати згідно з експериментальними даними [11].

Математичне моделювання напружень у склі

Вирішальним параметром чисельного моделювання ефектів вибуху є визначення та моделювання механічних

властивостей матеріалу. Вибухові хвилі можуть викликати значні структурні деформації, що перевищують лінійну область, і це означає, що потрібно мати справу з

такими поняттями, як пластичність, в'язкопластичність, великі деформації, висока швидкість деформації, руйнування та фрагментація тощо.

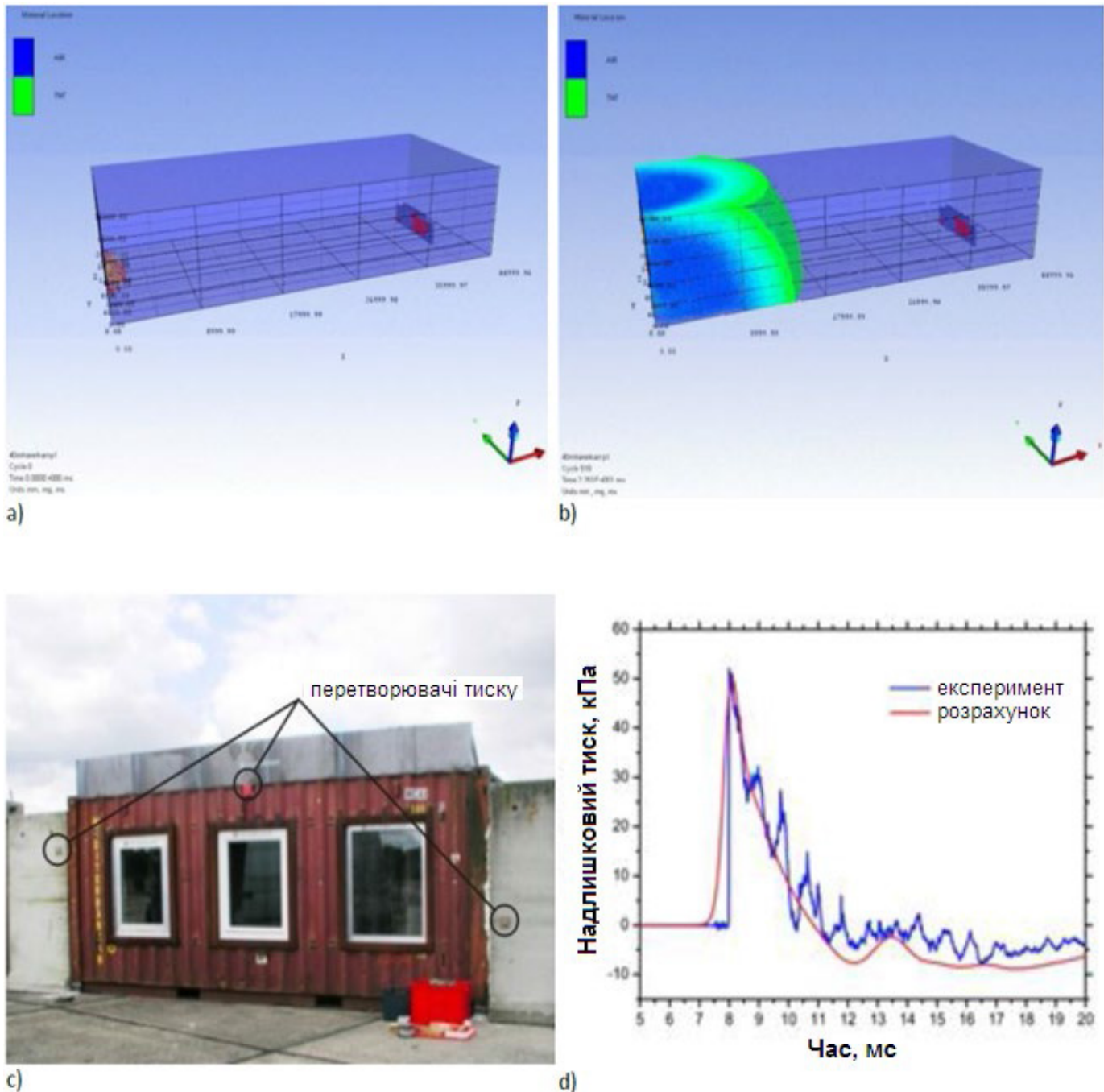


Рис. 5. Результати числового моделювання впливу вибуху на віконні конструкції, що проведене відповідно до методики зі стандарту GSA-TS01-2003 [9]: а) початкові умови, крок у часі 0,0 мс; б) ударна хвиля, що поширюється з кроком за часом 22,5 мс; в) експериментальна тестова установка з позначеними місцями розташування перетворювачів тиску, дані з яких використовуються для числового моделювання; г) зіставлення експериментальних даних із результатами розрахунків для однієї точки вимірювання на зовнішній поверхні стінової конструкції

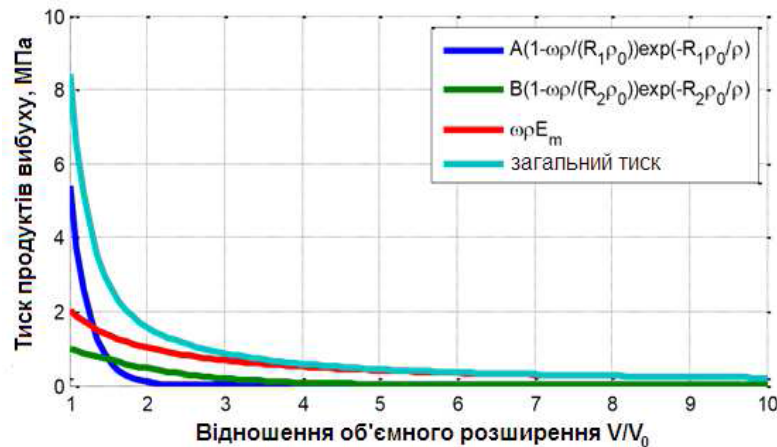


Рис. 6. Складові залежності тиск – об'ємне розширення, що розраховані за допомогою моделі *JWL* з використанням типових параметрів

Існує три різні типи скла: відпалене, загартоване та ламіноване. Їх можна відрізнити за середньою міцністю на розрив, яка становить від 70 до 250 МПа. Міцність одного типу скла сильно відрізняється через мікродфекти.

Динамічна міцність скла все ще потребує додаткових досліджень, але деякі експерименти зазначають вищу динамічну міцність, ніж статичну (*Peroni та ін.*, 2011) [12].

Відпалене скло повільно контролювано охолоджується, щоб зняти внутрішні напруги. Міцність цього відносно недорогого скла невелика, а її варіація поширена [8; 11, 13 - 17].

Загартоване скло в два або більше разів міцніше відпаленого скла. Виробництво здійснюється таким чином, щоб залишкові напруги залишалися в склі, але таким чином, щоб сприяти підвищенню його міцності на вигин. Обидві поверхні скла залишаються під тиском і при навантаженні тиском викликані напруження розтягування практично долаються наявним залишковим стисненням, і, таким чином, поверхня скла фактично не підлягає розтягуванню.

Ламіноване скло – це комбінація двох або більше скляних листів з одним або кількома полімерними прошарками. Було виготовлено декілька типів ламінованого скла з різними типами скляних матеріалів, наприклад, відпалене скло та загартоване скло, а також з різними проміжними шарами, такими як полівінілбутираль (PVB) і SentryGlas®Plus. Ламіноване скло має перевагу в тому, що після його руйнування внаслідок вибухового навантаження утворені фрагменти залишаються прилиплими до проміжного шару.

Серед математичних моделей руйнувань скляних конструкцій найбільш вживаними є наступні:

1. Шаруваті елементи зі спеціальним критерієм руйнування. Після руйнування скла напруження встановлюються рівними нулю, якщо деформації більше нуля (розтягнення), але матеріал все ще може реагувати на напругу стиснення. Якщо проміжний шар досягає критерію руйнування PVB, елемент руйнується (*Müller та ін.*, 2008) [18].

2. Розмазана модель використовується для моделювання поведінки після руйнування (*Timmel et al.*, 2007) [19]. Задаються параметри двох дотичних оболонок за двома різними матеріальними законами. Товщина, густина і модуль Юнга цих двох елементів оболонки розраховуються таким чином, щоб комбінація двох елементів оболонки представляла поведінку листа до руйнування. Поведінка ламінату після руйнування одного зі скляних шарів представлена лише одним із елементів оболонки.

3. 3D твердотільна модель. Для цього моделювання потрібні дуже дрібні сітки, що призводить до тривалого часу обчислення. Можна використовувати ті ж матеріальні закони, що і для шаруватих елементів оболонки. Деякі автори представляють тривимірні моделі з твердими елементами, що дозволяють використовувати детальний матеріальний закон для проміжного шару (*Wei та ін.*, 2006; *Беннісон та ін.*, 2005) [20, 21].

Математичне моделювання напружень у твердих конструктивних матеріалах світлопрозорих конструкцій

У разі вибуху дуже ймовірно, що деформації структурних елементів світлопрозорих конструкцій увійдуть у пластичну область. При цьому слід враховувати такі явища, як деформація та руйнування матеріалу. Було розроблено декілька моделей для опису поведінки металевих матеріалів в умовах суворого динамічного навантаження.

Існують моделі Людвіка (Moras, 1999) [22], Каупера-Саймондса, Армстронга-Зерілли (Zerilli та ін., 1987) [23]. Частіше використовується модель Джонсона-Кука (Johnson та ін., 1983) [24], що є емпіричним узагальненням основного закону Людвіка та виражає справжнє еквівалентне напруження через справжню еквівалентну пластичну деформацію ε_{eq}^{pl} .

$$\sigma_{eq} = \left(A_1 + A_2 \left(\varepsilon_{eq}^{pl} \right)^{\lambda_2} \right) \left(1 + \lambda_1 \ln \left(\frac{\varepsilon_{eq}^{pl}}{\varepsilon_{eq}^{pl} \min} \right) \right) (1 - \theta^m) \quad (4)$$

$$\theta = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (5)$$

де θ – гомологічна температура, К; A_1 , A_2 , λ_1 , λ_2 та m є константами, що визначаються шляхом підгонки моделі до експериментальних даних (A_1 – статична межа плинності). Форма цієї функції пов'язана з експериментальним спостереженням, що збільшення напруження плинності є логарифмічною функцією швидкості деформації.

Якщо з'єднання або каркасна конструкція недостатньо міцні, скло може від'єднатися та потрапити в будівлю на високій швидкості, травмуючи мешканців. Структурний силіконовий герметик зазвичай використовується для з'єднання ламіналу з каркасною конструкцією. Ламінат фіксується на двох або чотирьох краях скла за допомогою силіконового з'єднання на одній або обох сторонах ламіналу. Закріплення всіх чотирьох країв з обох сторін є рекомендованою практикою для вибухостійкості за допомогою силіконового з'єднання глибиною не менше 35 мм. Існують також інші способи фіксації ламінованого скла, такі як гумові прокладки, стрічка для скління та механічне точкове кріплення. Вважається, що ці системи, як правило, забезпечують нижчий захист від вибуху для силіконових країв (Hooper, та ін., 2012) [25].

Еластична опора цих гумових матеріалів вікон може бути змодельована суцільними елементами, які мають спільні вузлові елементи ламінованого скла. Вузли зверху і знизу слід закріпити. Закон пружності матеріалу можна використовувати з модулем Юнга 3,5 МПа. Однак вплив кріплення опори необхідно оцінити шляхом проведення параметричних досліджень з різними граничними умовами.

Перевірка/валідація та оцінка похибок є важливою метою всіх числових моделювань. Щоб визначити рівень прогнозування числового моделювання, СЕА (Commissariat à l'énergie atomique) розробив процес під назвою STANDARD V0.A (CEA). Ця процедура описує спосіб перевірки кожного кроку процесу моделювання в області впливу вибуху на конструкції. Ця процедура базується на аналізі та моделюванні різних конфігурацій вибухових речовин [11, 26; 27]. Кожен етап явища аналізується (рис. 7).

Детонаційний процес та вибух:

- поширення вибухової хвилі;
- взаємодія зі структурою.

Для кожного кроку перевіряються певні змінні. Основними змінними є:

- піковий тиск падаючої вибухової хвилі;
- час приходу вибухової хвилі;
- позитивний імпульс падаючого тиску;
- піковий тиск відбитої вибухової хвилі;
- позитивний імпульс відбитої вибухової хвилі.

Для кожного експерименту датчики тиску розташовані на різних відстанях і дублюються в одному місці, щоб оцінити невизначеність вимірювання. Приклад результатів визначення параметрів вибуху зарядів масою $M = 1$ кг та $M = 175$ кг [26] наведений на рис. 7.

Висновки

1. Після процесу моделювання вибухової хвилі необхідно оцінити параметри відгуку світлопрозорій конструкції та відповідну похибку визначення чинників впливу на неї. Слід застосовувати рекомендації з наведених стандартів, що базуються на визначенні конкретної змінної, що представляє структурну деформацію конструкції.

2. Визначення критичного тиску для конкретної конструкції прив'язане до визначення критичної відстані, на якій конструкція не витримає руйнівного впливу ударної частини вибухової хвилі.

3. В світі, а особливо в Європі та в країнах блоку НАТО давно і достатньо успішно опрацьовані алгоритми та створена законодавча і нормативно-технічна база оцінювання руйнувань будівель, зумовлених військовими діями, і подальшого поводження із ними – повного знесення, відновлення (точкового, поелементного чи поблочного; поточного і капітального ремонтів), їх реставрації або створення новобудов. Задача України – опанувати накопичений досвід і успішно використати його в поєднанні із здобутками вітчизняної будівельної науки і промисловості інноваційних будівельних матеріалів.

4. Наведені результати є вкрай актуальними і важливими для реалізації стратегії термомодернізації будівель України [28], особливо в частині відновлення пошкодженої війною інфраструктури, включаючи найбільш масові і поширені типи руйнування віконних конструкцій.

5. Рекомендувати до виконання в 2025-2029 рр. силами трьох наукових відділів ІТТФ НАН України нову бюджетну фундаментальну тему з робочою назвою «Аеродинаміка та теплообмін в інноваційних світлопрозорих конструкціях і в тепломасообмінному устаткуванні та їх використання для повоєнного відновлення пошкоджених вибуховою хвилею будівель країни»

Робота виконана за сприяння Національного фонду досліджень України. Матеріали статті містять наукові результати, що отримані для виконання договору проєкту № 92/0172 «Аеродинаміка, теплообмін та інновації для підвищення енергоефективності віконних конструкцій і їх використання для відбудови пошкоджених війною будівель України» конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wei J., Dharani L. 2006. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading. International Journal of Impact Engineering; 32:2032-47.
2. Kingery C.N., Bulmash G., 1984. Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst. AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
3. Gebbeken, N., Döge, N. and Hübner, M. 2012. Vom Explosionsszenario zur Bemessungslast. 5. Workshop 'BAU-PROTECT' Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen.
4. Larcher M., Solomos G., Casadei F., Gebbeken N. 2012. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading. Int. J. Impact Engineering (39) 42-50.
5. Riedel, W., et al. 2010. Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. International Journal of Protective Structures.
6. Johnson, G.R., Holmquist, T.J. 1993. An improved computational constitutive model for brittle materials, Joint AIRA/APS Conference, Colorado Springs, Colorado, June 1993.
7. Du Bois P.A., Kolling S., Fassnacht W. 2003. Modelling of safety glass for crash simulation. Computational Materials Science; 28(3e4):675-83.

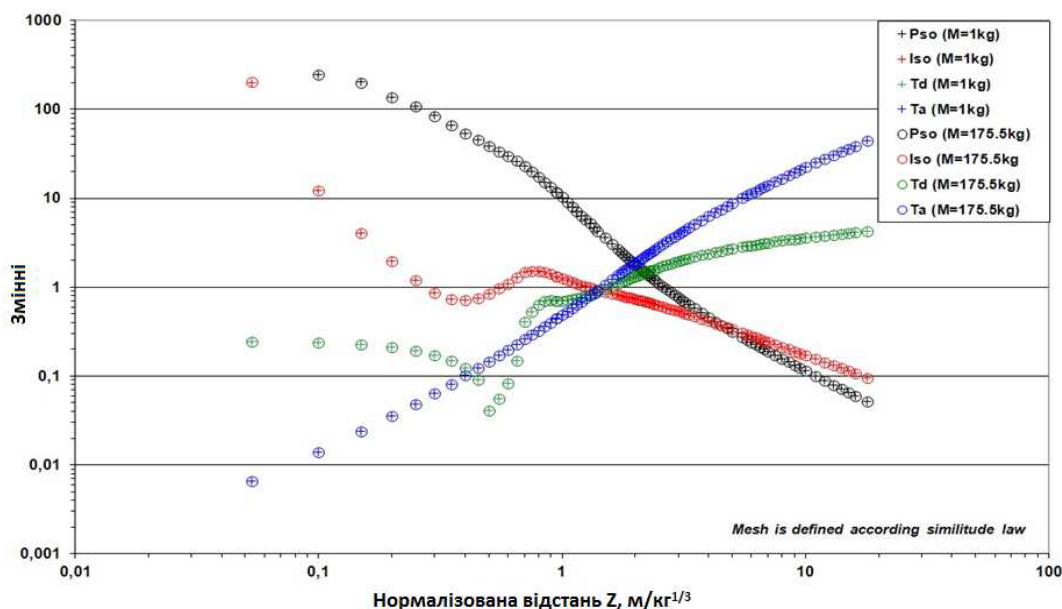


Рис. 7. Релевантний графік із наявних емпіричних та аналітичних взаємозв'язків. Змінні (як функції нормалізованої відстані Z , вісь ординат): T_a – час прибуття фронту вибухової хвилі, P_{so} – піковий надлишковий тиск на поверхні конструкції; I_{so} – імпульс тиску

8. *Abaqus 2012*. Abaqus version 6.12 manual, Dassault Systems.
9. *GSA -US General Services Administration 2003*. Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings, GSA-TS01-2003.
10. *Dobratz B.M., Crawford P.C.* 1985. LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-52997, Lawrence Livermore Laboratory, Berkeley.
11. *Kinney G.F., Graham K.J.* 1985. Explosive shocks in air. Second edition. Springer Berlin.
12. *Peroni M., Solomos G., Pizzinato V., Larcher M.*, 2011. Experimental investigation of high strain-rate behaviour of glass. *Applied Mechanics and Materials*, (82) 63-68.
13. *Kranzer C., Gürke G., Mayrhofer C.* 2005. Testing of bomb resistant glazing systems. Experimental investigation of the time dependent deflection of blast loaded 7.5 mm laminated glass. In: *Glass processing days*.
14. *Beason, W.L., Morgan, J.R.* 1984. Glass failure prediction model. *Journal of Structural Engineering*, 110 (2), pp. 197-212.
15. *Overend M., Parke G.A.R., Buhagiar D.*, 2007. Predicting failure in glass – A general crack growth model. *Journal of Structural Engineering*, 133(8), pp. 1146-1155.
16. *Brown, W.G.* 1974. A Practicable Formulation for the Strength of Glass and Its Special Application to Large Plates. Publication No. NRC 14372, National Research Council of Canada, Ottawa.
17. *Johnson, G.R., Holmquist, T.J.* 1993. An improved computational constitutive model for brittle materials, Joint AIRA/APS Conference, Colorado Springs, Colorado, June 1993.
18. *Müller R., Wagner M.* 2008. Berechnung sprengwirkung shemmender Fenster- und Fassadenkonstruktionen. *Bauingenieur*; 81(11):475-87.
19. *Timmel M., Kolling S., Osterrieder P., Du Bois P.* 2007. A finite element model for impact simulation with laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*; 34:1465-78.
20. *Wei J., Dharani L.* 2006. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*; 32:2032-47.
21. *Bennison S.J., Jagota A., Smith C.A.* 1999. Fracture of glass/poly (vinyl butyral) (butacite) laminates in biaxial flexure. *Journal of the American Ceramic Society*; 82(7):1761-70.
22. *Moras B.*, 1999. Constitutive Equations of Strain Rate Sensitive Materials for the Automotive Industry. PLEXIS-3C Implementation Report, JRC Technical Note N. I.99.54.
23. *Zerilli F.J., Armstrong R.W.*, 1987. Dislocation-Mechanics-Based constitutive relations for material dynamics calculations, *Journal of Applied Physics*, (61), pp. 1816-1825.
24. *Johnson G.R., Cook, W.H.*, 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*: 541–547.
25. *Hooper P.A., Sukhram R.A.M., Blackman B.R.K., Dear J.P.*, 2012. On the blast resistance of laminated glass, *International Journal of Solids and Structures*, (49) pp. 899-918.
26. *Unified Facilities Criteria UFC 3-240-02*, 2008. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, US Department of Defense, US Army Corps of Engineers, Naval facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency – 5 December 2008 (replaces ARMY TM5-1300 of November 1990).
27. *Baker W.E.* 1973. Explosions in Air, University of Texas.
28. Деякі питання стратегічного розвитку енергетичної ефективності будівель. Розпорядження КМУ від 29 грудня 2023 р. № 1228-р/

RESISTANCE OF TRANSPARENT STRUCTURES TO EXPLOSION INFLUENCES. OVERVIEW OF RESEARCH METHODS AND ANALYSIS OF INDIVIDUAL RESULTS

Basok B.I.¹, Nedbailo O.M.²

¹*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Professor, ORCID 0000-0002-8935-4248, borys.basok@gmail.com*

²*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), SRF, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Professor, ORCID 0000-0003-1416-9651, nan_sashulya@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.8>

The paper analyzes the potential of numerical modeling of the destructive impact of explosions from the point of view of its application to enclosing structures (including translucent ones). For the most common methods, a brief comprehensive theoretical basis with requirements, implementation and corresponding examples of results is given. In addition, the interpretation of the measurements is given. Separate simplified mathematical models, basic discretization schemes of the obtained values of the determining variables and calculation results are presented in combination with abbreviated descriptions of the main parameters of the materials of the fencing structures.

After the blast wave modeling process, it is necessary to estimate the response parameters of the translucent structure and the corresponding error in determining the factors affecting it. Recommendations from the above standards, based on the definition of a specific variable representing the structural deformation of the structure, should be applied.

The determination of the critical pressure for a specific structure is tied to the determination of the critical distance at which the structure cannot withstand the destructive impact of the shock wave.

The work was carried out with the assistance of the National Research Fund of Ukraine. The materials of the article contain the scientific results obtained as part of the implementation of the project No. 208/0172 "Aerodynamics, heat exchange and innovations to increase the energy efficiency of window structures and their use for

the reconstruction of war-damaged buildings of Ukraine" competition "Science for the reconstruction of Ukraine in the war and post-war periods".

References 27, figures 7, tables 1.

Key words: explosion, detonation, explosive wave, explosive load, enclosing translucent structure, deformation of structural elements, stress.

1. Wei J., Dharani L. 2006. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*; 32:2032-47.

2. Kingery C.N., Bulmash G., 1984. Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst. AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.

3. Gebbeken, N., Döge, N. and Hübner, M. 2012. Vom Explosionsszenario zur Bemessungslast. 5. Workshop 'BAU-PROTECT' Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen.

4. Larcher M., Solomos G., Casadei F., Gebbeken N. 2012. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading. *Int. J. Impact Engineering* (39) 42-50.

5. Riedel, W., et al. 2010. Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. *International Journal of Protective Structures*.

6. Johnson, G.R., Holmquist, T.J. 1993. An improved computational constitutive model for brittle materials, Joint AIRA/APS Conference, Colorado Springs, Colorado, June 1993.

7. Du Bois P.A., Kolling S., Fassnacht W. 2003. Modelling of safety glass for crash simulation. *Computational Materials Science*; 28(3e4):675-83.

8. *Abaqus 2012*. Abaqus version 6.12 manual, Dassault Systems.

9. GSA -US General Services Administration 2003. Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings, GSA-TS01-2003.

10. Dobratz B.M., Crawford P.C. 1985. LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-52997, Lawrence Livermore Laboratory, Berkeley.

11. Kinney G.F., Graham K.J. 1985. Explosive shocks in air. Second edition. Springer Berlin.

12. Peroni M., Solomos G., Pizzinato V., Larcher M., 2011. Experimental investigation of high strain-rate behaviour of glass. *Applied Mechanics and Materials*, (82) 63-68.

13. Kranzer C., Gürke G., Mayrhofer C. 2005. Testing of bomb resistant glazing systems. Experimental investigation of the time dependent deflection of blast loaded 7.5 mm laminated glass. In: Glass processing days.
14. Beason, W.L., Morgan, J.R. 1984. Glass failure prediction model. Journal of Structural Engineering, 110 (2), pp. 197-212.
15. Overend M., Parke G.A.R., Buhagiar D., 2007. Predicting failure in glass – A general crack growth model. Journal of Structural Engineering, 133(8), pp. 1146-1155.
16. Brown, W.G. 1974. A Practicable Formulation for the Strength of Glass and Its Special Application to Large Plates. Publication No. NRC 14372, National Research Council of Canada, Ottawa.
17. Johnson, G.R., Holmquist, T.J. 1993. An improved computational constitutive model for brittle materials, Joint AIRA/APS Conference, Colorado Springs, Colorado, June 1993.
18. Müller R., Wagner M. 2008. Berechnung sprengwirkung shemmender Fenster- und Fassadenkonstruktionen. Bauingenieur; 81(11):475-87.
19. Timmel M., Kolling S., Osterrieder P., Du Bois P. 2007. A finite element model for impact simulation with laminated glass. International Journal of Impact Engineering; 34:1465-78.
20. Wei J., Dharani L. 2006. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading. International Journal of Impact Engineering; 32:2032-47.
21. Bennison S.J., Jagota A., Smith C.A. 1999. Fracture of glass/poly (vinyl butyral) (butacite) laminates in biaxial flexure. Journal of the American Ceramic Society; 82(7):1761-70.
22. Moras B., 1999. Constitutive Equations of Strain Rate Sensitive Materials for the Automotive Industry. PLEXIS-3C Implementation Report, JRC Technical Note N. I.99.54.
23. Zerilli F.J., Armstrong R.W., 1987. Dislocation-Mechanics-Based constitutive relations for material dynamics calculations, Journal of Applied Physics, (61), pp. 1816-1825.
24. Johnson G.R., Cook, W.H., 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics: 541–547.
25. Hooper P.A., Sukhram R.A.M., Blackman B.R.K., Dear J.P., 2012. On the blast resistance of laminated glass, International Journal of Solids and Structures, (49) pp. 899-918.
26. Unified Facilities Criteria UFC 3-240-02, 2008. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, US Department of Defense, US Army Corps of Engineers, Naval facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency – 5 December 2008 (replaces ARMY TM5-1300 of November 1990).
27. Baker W.E. 1973. Explosions in Air, University of Texas.
28. Some issues of strategic development of energy efficiency of buildings. Decree of the CMU, dated December 29, 2023 No. 1228. (ukr)

Отримано 16.04.2024

Received 16.04.2024

Прийнято до друку 17.08.2024
Accepted for publication 17.08.2024