

УДК 534.1:539.3

Н.В. СМЕТАНКІНА, С.В. УГРИМОВ

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДГУКУ БАГАТОШАРОВОГО СКЛА НА
ВИБУХОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ФАЗИ РОЗРІДЖЕННЯ**

Стаття присвячена дослідженню відгуку багатошарового скла на вплив ударної хвилі з урахуванням як фази підвищеного тиску, так і фази розрідження. Динамічна поведінка скла описується рівняннями узагальненої моделі багатошарових пластин, яка заснована на методі степеневих рядів і дозволяє врахувати усі необхідні компоненти деформацій та напружень у шарах конструкції. Вплив повітряної ударної хвилі описується експоненційною залежністю, що була запропонована Кіннеу для аналізу фази надлишкового тиску, і яка може бути застосована й для аналізу фази розрідження. Розв'язок задачі отримано аналітико-чисельним методом. На чисельних прикладах досліджено вплив урахування фази розрідження в ударних хвилях на параметри напружено-деформованого стану оскління.

Ключові слова: багатошарове оскління, напружено-деформований стан, повітряна ударна хвиля, фаза тиску, фаза розрідження.

Н.В. СМЕТАНКИНА, С.В. УГРИМОВ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА МНОГОСЛОЙНОГО СТЕКЛА НА
ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ С УЧЕТОМ ФАЗЫ РАЗРЕЖЕНИЯ**

Статья посвящена исследованию отклика многослойного стекла на воздействие ударной волны с учетом как фазы повышенного давления, так и фазы разрежения. Динамическое поведение стекла описывается уравнениями обобщенной модели многослойных пластин, которая основана на методе степенных рядов и позволяет учесть все необходимые компоненты деформаций и напряжений в слоях конструкции. Влияние воздушной ударной волны описывается экспоненциальной зависимостью, которая была предложена Киннеу для анализа фазы избыточного давления, и которая может быть применена и для анализа фазы разрежения. Решение задачи получено аналитико-численным методом. На численных примерах исследовано влияние учета фазы разрежения в ударных волнах на параметры напряженно-деформированного состояния остекления.

Ключевые слова: многослойное остекление, напряженно-деформированное состояние, воздушная ударная волна, фаза сжатия, фаза разрежения.

N.V. SMETANKINA, S.V. UGRIMOV

A. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine

**MATHEMATICAL MODELING OF RESPONSE OF MULTILAYER GLAZING UNDER BLAST
LOADING WITH EFFECT OF UNDERPRESSURE PHASE**

When we analyze the strength of structural elements under various explosions it is necessary to take into account several factors at once: an impact of primary and secondary fragments, temperature fields, as well as the influence of the air shock wave. There are transient processes, which require consideration of dynamic deformation processes to assess the structural strength. The paper presents an investigation of the response of a laminated glass to the impact of a shock wave, taking into account both the phase of increased pressure and the underpressure phase. Dynamic behavior of the glass is described by the equations of the generalized model of multilayer plates, which is based on the method of power series and allows to take into account all the necessary components of strains and stresses in the layers of the structure. The effect of an air shock wave is described by the exponential dependence that proposed Kinney for analyze the phase of excess pressure, and which can be applied to the analysis of the underpressure phase. The solution of the problem is obtained by an analytical-numerical method.

Numerical examples have been used to study the effect of accounting for the underpressure phase in shock waves on the parameters of the strain-stressed state of glazing. The numerical results of a investigation of stress-strained state for a three-layer glass on the influence of the air shock wave taking into account and without consideration the underpressure phase are given. The results were compared with the data obtained by L.R. Dharani, J. Wei for case architectural glass. There is a good agreement between the results, which confirms the efficiency of the proposed approach. Also the investigation of the response of glazing for transport vehicles on blast loading is carried out. It has been established that in some cases the consideration of the underpressure phase is necessary. It is shown that taking into account the influence of this phase can lead to increase deflections and stresses in glass layers almost twice.

Keywords: multilayer glazing, stress-strain state, blust loading, compression phase, underpressure phase.

Постановка проблеми

Багатошарове скло широко використовується у сучасному будівництві та осклінні транспортних засобів. Воно є більш травмобезпечним, оскільки при ударі не розтрощується на окремі уламки, які можуть привести до травм людини. Зазвичай, для оскління використовуються триплекси (тришарове скло із двома шарами скла). При необхідності забезпечити захист від особливих навантажень (кулестійкість, птахостійкість тощо) використовуються багатошарові пакети. Таке оскління виконується із шарів силікатного скла (СС), органічного, полікарбонату, які з'єднуються полівінілбутираллю (ПВБ) або іншими клейовими шарами. Для підвищення міцності пакету замість звичайних використовуються зміцнені силікатні стекла. Таке зміцнення здійснюється формуванням високих напружень стиску в поверхневих шарах скла хіміко-термічною обробкою, загартовуванням, а також видаленням поверхневого дефектного шару хімічним травленням, що підвищує міцність скла у декілька разів. Загальна товщина багатошарових стекел може бути досить значною і в деяких випадках їх неможливо віднести до тонких конструкцій. Крім того, механічні властивості шарів відрізняються на декілька порядків, тому при аналізі напружено-деформованого стану (НДС) необхідно враховувати можливе поперечне обтиснення пакету та поворот нормальних елементів у кожному його шарі.

При аналізі міцності елементів конструкцій при різноманітних вибухах необхідно враховувати відразу кілька вражаючих факторів: удар первинними й вторинними уламками, температурні впливи, а також вплив повітряної ударної хвилі. Усе це швидкоплинні процеси, які для оцінки міцності конструкції потребують розгляду динамічних процесів деформування. Дослідження впливу повітряних ударних хвиль на елементи конструкцій зазвичай проводяться тільки з урахуванням дії надлишкового тиску, а фаза розрідження зовсім не враховується. У роботі досліджується НДС оскління при впливі повітряної ударної хвилі з урахуванням фази розрідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вплив повітряної ударної хвилі на елементи конструкцій, насамперед, визначається різкою зміною тиску на поверхні. Швидкий викид енергії під час вибуху приводить до різкого збільшення тиску з наступним його поступовим зменшенням до звичайних значень. Ця фаза надлишкового тиску змінюється фазою розрідження, при якій тиск стає меншим за атмосферний. Тривалість цієї фази зазвичай є більшою, ніж фази дії надлишкового тиску. При цьому при звичайних вибухах максимальний надлишковий тиск значно більший, ніж величина тиску на стадії фази розрідження. Тому при оцінці міцності елементів конструкцій на вплив повітряної ударної хвилі досить часто враховують тільки стадію надлишкового тиску [1-5]. Це спрощення виправдане при розгляді жорстких конструкцій, які незначно деформуються.

Останнім часом з'явився цілий ряд робіт [6-12], у яких відзначається значний вплив саме фази розрідження на динамічний відгук багатошарового скла. Так, J.L. Smith із співавторами повідомили, що при в експериментальних дослідженнях скла при вибухових навантаженнях спостерігалось його руйнування не на фазі дії підвищеного тиску [6]. Т. Krauthammer та А. Altenberg припустили, що вплив саме фази розрідження став причиною руйнування скла. У роботі [7] вони провели дослідження впливу саме цієї фази на руйнування скла. L.R. Dharani та J. Wei [8, 9] провели детальне чисельне дослідження відгуку архітектурного тришарового скла на вплив повітряної ударної хвилі. Було встановлено, що при врахуванні впливу фази розрідження прогини й напруження у склі можуть практично у два рази перевищувати значення, що спостерігаються при врахуванні тільки фази надлишкового тиску. Таке підвищення напружень може приводити до того, що скло, яке витримало стадію дії надлишкового тиску, руйнується пізніше. Таким чином, для аналізу НДС оскління при впливі ударної хвилі необхідним є врахування фази розрідження.

Мета дослідження

Метою роботи є створення методу розрахунку та проведення дослідження відгуку багатошарового скла реальних транспортних засобів на вплив повітряної ударної хвилі з урахуванням фази розрідження. Ця робота є продовженням раніше проведених авторами досліджень впливу повітряної ударної хвилі, у яких не враховувалася дія цієї фази.

Викладення основного матеріалу дослідження

Математична модель зміни тиску при вибухові. Вибухові хвилі поширюються у вигляді ударних хвиль, на фронті яких стрибкоподібно змінюється тиск, щільність і температура. Навантаження від ударної хвилі діє на зовнішню поверхню конструкції й визначається у вигляді функції, що змінюється за часом. У якості основного фактора, за яким оцінюється небезпека вибуху, приймається значення надлишкового тиску на фронті ударної хвилі при підході до досліджуваного об'єкта. При цьому необхідно враховувати процес обтікання конструкції ударною хвилею.

На рис. 1 показана характерна зміна тиску повітряної хвилі у фіксованій у просторі точці [5, 13–15].

Головною особливістю ударної хвилі є різке зростання тиску в її фронті від вихідного атмосферного тиску p_A до максимального значення $p_A + \Delta p_{\Phi}$ і потім падіння до атмосферного тиску. Час τ_+ , протягом якого тиск зростає від p_A до $p_A + \Delta p_{\Phi}$, визначає тривалість фази стискання. Фаза стискання змінюється фазою розрідження тривалістю τ_- , у якій тиск виявляється нижчим атмосферного на Δp_- .

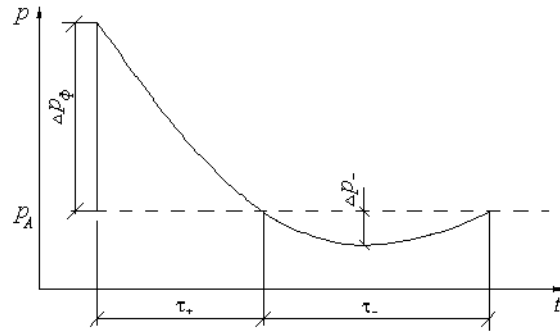


Рис. 1. Зміна тиску у фронті ударної хвилі.

Величина надлишкового тиску у фронті ударної хвилі залежить від типу й маси вибухової речовини, а також від відстані до точки вибуху. Параметри повітряної ударної хвилі можуть бути визначені за співвідношеннями, отриманими М.О. Садовським на основі теорії подібності [13, 14], або іншими залежностями [8, 9, 12]. Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі Δp_ϕ й тривалість фази стискання при повітряному вибухові можуть бути визначені за експериментальними залежностями:

$$\Delta p_\phi = \frac{0,084 \sqrt[3]{M}}{R} + \frac{0,27 \sqrt[3]{M^2}}{R^2} + 0,7 \frac{M}{R^3}, \quad \tau_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{M} \sqrt{R},$$

де M – маса еквівалентного тротилового заряду; R – відстань від центра вибуху до перешкоди.

Імпульс, що діє на конструкцію під час вибуху, на стадії підвищеного тиску може бути описаний різними математичними співвідношеннями. Найчастіше використовуються лінійні [12–14] та експоненційні наближення [4, 5, 8, 12–15]. G.F. Kinney [16] для опису зміни тиску на цій стадії використав експоненційну залежність у вигляді

$$\Delta p(t) = \Delta p_\phi \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right) \exp\left(-\alpha \frac{t}{\tau_+}\right), \tag{1}$$

де $\Delta p(t)$ – підвищення тиску на перешкоді; Δp_ϕ – максимальне значення тиску у момент при $t = 0$; τ_+ – час дії фази підвищеного тиску; α – коефіцієнт розпаду [8, 16].

Зміну тиску на стадії розрідження зазвичай рекомендують описувати лінійною залежністю у вигляді трикутного імпульсу [12, 17]. L.R. Dhanani використав і для цієї стадії ту ж експоненціальну залежність (1), що раніше застосовувалася тільки на стадії стиску. У роботі [8] він навів формули для визначення трьох коефіцієнтів у залежності (1). Ці коефіцієнти залежать від маси тротилового заряду та відстані від центру вибуху. L.R. Dhanani показав [8], що результати, отримані за цією формулою, добре узгоджуються з експериментальними даними, наведеними J.L. Smith та інші в роботі [6].

Ми також будемо виходити з того, що тиск за фронтом ударної хвилі змінюється за експоненційним законом (1). У результаті дослідження НДС оскління при впливі повітряної ударної хвилі зводиться до розв'язання задачі про імпульсне деформування багат шарової конструкції.

Математична модель багат шарового скла. Розглядається багат шарове скло, яке закріплене по краю і перебуває під впливом розподіленого імпульсного навантаження, викликаного впливом повітряної ударної хвилі. Необхідно визначити НДС у шарах скла. Скло (рис. 2) складається із I шарів постійної товщини (h_i – товщина i -го шару). Припускається, що контакт між шарами виключає їхнє розшарування й взаємне проковзування.

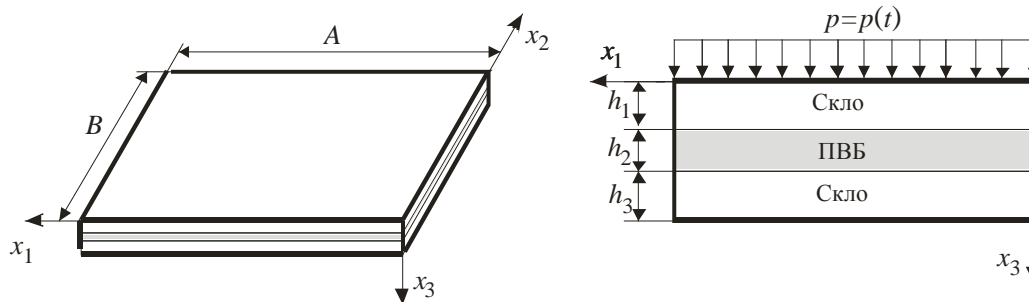


Рис. 2. Багат шарове скло.

Поведінка скла описується рівняннями узагальненої моделі багатошарових пластин [18, 19], яка дозволяє обирати необхідну точність опису НДС залежно від композиції пакета і умов навантаження. У загальному випадку переміщення точки i -го шару описуються наступними кінематичними залежностями:

$$u_v^i(x_1, x_2, x_3, t) = u_v + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^{i-1} h_j^k u_{vk}^j + (x_3 - \delta_{i-1})^k u_{vk}^i \right], \quad v = 1, 2,$$

$$u_3^i(x_1, x_2, x_3, t) = u_3 + \sum_{\ell=1}^L \left[\sum_{j=1}^{i-1} h_j^\ell u_{3\ell}^j + (x_3 - \delta_{i-1})^\ell u_{3\ell}^i \right], \quad (2)$$

де $h_j^k = (h_j)^k$; $\delta_i = \sum_{j=1}^i h_j$, $\delta_{i-1} \leq x_3 \leq \delta_i$, $i = \overline{1, I}$; $u_\alpha^i (\alpha = \overline{1, 3})$ – переміщення точки i -го шару в напрямку

осі Ox_α ; $u_\alpha, u_{\alpha k}^i$ – коефіцієнти розвинень переміщень у степеневі ряди, які є функціями аргументів x_1, x_2, t ; K_α^i – максимальні степені поперечної координати для площинних ($\alpha = 1, 2$) і поперечних ($\alpha = 3$) переміщень точок i -го шару, які вибираються залежно від необхідної точності.

Змінюючи кількість утримуваних членів у степеневих рядах (2), можна одержати різні за точністю двовимірні апроксимації НДС. Прийняті кінематичні залежності (2) при $K = 1, L = 0$ еквівалентні гіпотезам моделі Є.І. Григолюка, П.П. Чулкова [20], при $K = 1, L = 1$ – гіпотезам уточненої моделі першого порядку, що враховує обтиснення кожного шару [18, 21], а при $K = 3, L = 2$ – гіпотезам моделі високого порядку, яка дозволяє досліджувати локалізовані навантаження [18, 22].

Зазвичай багатошарове скло складається із шарів, механічні властивості яких відрізняються на декілька порядків. Тому при аналізі його НДС необхідно враховувати можливе поперечне обтиснення пакета. Раніше у роботах [18, 19, 23] було встановлено, що для аналізу згинних напружень у тонких та середньої товщини багатошарових пластинах при дії розподілених, нелокалізованих навантажень доцільно використовувати гіпотези уточненої моделі першого порядку ($K = 1, L = 1$), що враховує обтиснення кожного шару. Саме ця модель буде використана для аналізу відгуку багатошарового скла на імпульсне навантаження.

Деформації у кожному шарі пластини вважаються малими й описуються лінійними співвідношеннями. Напруження і деформації у шарах пов'язані законом Гука. Рівняння руху багатошарового скла та граничні умови отримано з варіаційного принципу Остроградського-Гамільтона. Рівняння руху в зусиллях та моментах для багатошарової пластини мають вигляд [18]:

$$\sum_{i=1}^I [L_\alpha^i - I_{\alpha 1}^i] + p_\alpha = 0,$$

$$N_{1\alpha,1}^{ik} + N_{\alpha 2,2}^{ik} - k_\alpha N_{\alpha 3}^{ik\alpha-1} + h_i^{k_\alpha} \sum_{j=i}^{I-1} [L_\alpha^{j+1} - I_{\alpha 1}^{j+1}] - I_{\alpha k_\alpha+1}^i = 0, \quad (3)$$

де $L_1^i = N_{11,1}^{i0} + N_{12,2}^{i0}$, $L_2^i = N_{22,2}^{i0} + N_{12,1}^{i0}$, $L_3^i = N_{13,1}^{i0} + N_{23,2}^{i0}$,

$$I_{\alpha r}^i = \frac{\rho_i h_i^r}{r} \left(u_{\alpha 0,tt} + \sum_{k=1}^{K_\alpha} \left[\sum_{j=1}^{i-1} h_j^k u_{\alpha k,tt}^j + \frac{r h_i^k}{k+r} u_{\alpha k,tt}^i \right] \right),$$

$$N_{\alpha\beta}^{ik} = N_{\beta\alpha}^{ik} = \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} (x_3 - \delta_{i-1})^k p_{\alpha\beta}^i dx_3, \quad \alpha = \overline{1,3}, \quad k_\alpha = \overline{1, K_\alpha}, \quad i = \overline{1, I}.$$

Кількість рівнянь залежить від числа шарів і дорівнює для обраної моделі $3I + 3$.

Метод розв'язання. Метод розв'язання системи рівнянь (3) для прямокутних шарнірно опертих багатошарових пластин полягає у наступному. Переміщення і зовнішні навантаження розвиваються у ряди по функціям, які задовольняють граничним умовам, в результаті чого задача про коливання багатошарової пластини зводиться до інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Ця система інтегрується за допомогою однокрокового методу [18], який ґрунтується на розвиненні розв'язку в ряд Тейлора. Для пластин, що мають складну форму у плані або складні граничні умови опираючі, для розв'язання використовується метод занурення [18, 21], ідея якого полягає у зануренні вихідної пластини складної форми у плані у допоміжну шарнірно-оперту прямокутну пластину, для якої розв'язок можна легко отримати аналітично. При цьому для того, щоб процес деформування вихідної та розширеної системи був

ідентичним, по контуру вихідної пластини прикладаються компенсуючі навантаження, які знаходяться у ході розв'язання задачі.

Закріплення стеклов у прорізах автомобілів здійснюється за допомогою гумового ущільнювача, який фіксується по периметру замком з полімерного матеріалу або гуми. Це дозволяє розглядати елементи оскління як шарнірно оперті пластини. Тому переміщення й навантаження розвиваються в тригонометричні ряди по функціях, що задовольняють умовам шарнірного опирання:

$$u_j^i(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{jmn}^i(t) B_{jmn}(x, y), \quad p_j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{jmn}(t) B_{jmn}(x, y), \quad j = \overline{1,3}, \quad i = \overline{1,3},$$

$$B_{1mn} = \cos \alpha_m x_1 \sin \beta_n x_2, \quad B_{2mn} = \sin \alpha_m x_1 \cos \beta_n x_2, \quad B_{3mn} = \sin \alpha_m x_1 \sin \beta_n x_2, \quad \alpha_m = m\pi/A, \quad \beta_n = n\pi/B.$$

Будемо вважати, що оскління розташоване фронтально до напрямку поширення ударної хвилі, тоді її вплив на зовнішню поверхню першого шару будемо описувати залежністю (1).

Коефіцієнти розвинення навантаження (1) у ряд Фур'є мають вигляд:

$$p_{3mn} = \frac{4}{m\pi^2} \Delta p_{\phi} \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right) \exp\left(-\alpha \frac{t}{\tau_+}\right) \cdot (\cos m\pi - 1) \cdot (\cos n\pi - 1).$$

Чисельні результати та обговорення. Проведено чисельне дослідження впливу повітряної ударної хвилі (1) на різні за призначенням тришарові стекла. Параметри ударної хвилі вибрано аналогічно даним, наведеним у роботі [8]: $\tau_+ = 7,7$ мс, $\alpha = 0,55$, $\Delta p_{\phi} = 6894,8$ Па.

Для оцінки достовірності розробленого методу проведено дослідження тришарового квадратного архітектурного скла з геометричними характеристиками $A = B = 1,325$ м, $h_1 = h_3 = 4,76$ мм, $h_2 = 1,52$ мм, зовнішні шари якого виконані із СС з механічними характеристиками: $E_i = 72$ ГПа, $\rho_i = 2500$ кг/м³, $\nu_i = 0,25$, $i = 1,3$. Другий шар виконано із ПВБ: $E_2 = 0,274$ ГПа, $\rho = 1100$ кг/м³, $\nu_2 = 0,38$. Тут E_i – модуль пружності, ν_i – коефіцієнт Пуассона, ρ_i – щільність i -го шару. Результати розрахунку порівнювалися із даними аналогічного дослідження, проведеного L.R. Dharani, як аналітично, так і чисельно за допомогою комплексу LS-DYNA3D [8, 9].

На рис. 3 показано зміну за часом прогинів посередині скла при впливі повітряної ударної хвилі без урахування (пунктирна лінія) та з урахуванням фази розрідження (суцільна лінія). Результати розрахунку порівнюються із даними, отриманими L.R. Dharani (точки – без урахування, штрихпунктир – з урахуванням фази розрідження). Спостерігається добре узгодження результатів, що підтверджує їх достовірність і працездатність запропонованого підходу.

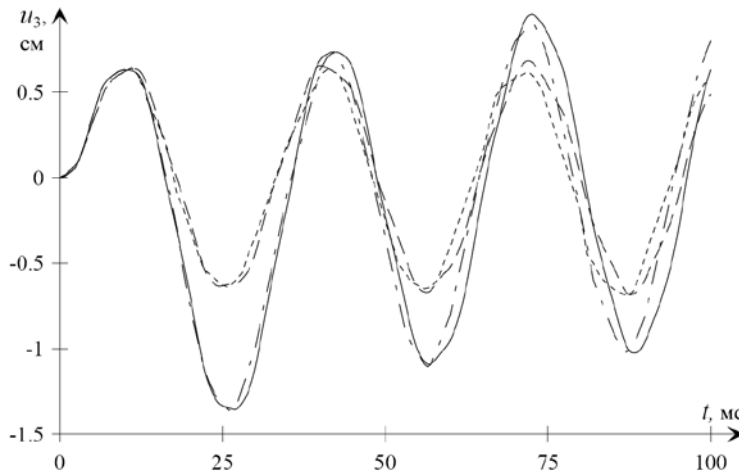


Рис. 3. Зміна за часом прогинів.

Розглянуто вплив повітряної ударної хвилі з тими ж параметрами на оскління деяких вантажних автомобілів. Композицію спеціального оскління для цих автомобілів раніше було підібрано у роботі [4]. Запропоноване оскління, згідно з вимогами по міцності, витримує надлишковий тиск з параметрами $\Delta p = 30$ кПа й $\tau_+ = 1$ с. Це тришарове скло, зовнішні шари якого виготовлено з СС з механічними характеристиками $E_i = 6,8 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_i = 0,22$, $\rho_i = 2500$ кг/м³ ($i = 1,3$), а внутрішній – з ПВБ,

характеристики якого становлять $E_2 = 280$ МПа, $\nu_2 = 0,38$, $\rho_2 = 1200$ кг/м³. Типи автомобілів та геометричні параметри оскління наведено у табл. 1.

У табл. 2 наведено максимальні значення напружень на зовнішніх поверхнях несучих шарів, отримані на основі запропонованої методики при використанні моделі ударного імпульсу у вигляді експоненційної залежності із урахуванням та без урахування фази розрідження.

Таблиця 1

Геометричні параметри вітрових стекел

Тип автомобіля	$A \times B$, мм	Композиція $h_1(h_2)h_3$, мм
КамАЗ-5320, КамАЗ-4310	1024 x 662	5 (2) 5
Урал-375, Урал-432	788 x 384	3 (2) 3
КрАЗ-260	855 x 563	3 (2) 5

Таблиця 2

Напруження в шарах оскління

Тип автомобіля	Номер шару i	Напруження p_{ii} , МПа			
		без урахування стадії розрідження		із врахуванням стадії розрідження	
		Min	max	min	max
КамАЗ-5320 КамАЗ-4310	1	-9,29	7,28	-9,29	8,52
	3	-7,29	9,28	-8,52	9,28
Урал-375 Урал-432	1	-7,77	6,18	-7,77	7,79
	3	-6,18	7,77	-7,79	-7,77
КрАЗ-260	1	-10,56	9,72	-10,56	10,87
	3	-9,18	9,95	-10,24	9,95

Видно, що урахування фази розрідження змінює значення і розподіл напружень у шарах оскління, але не так істотно, як це було у попередньому випадку. Різниця результатів без та з урахуванням фази розрідження не перевищує 20%, але максимальні значення розтягуючих напружень залишилися практично незмінними для усіх видів оскління. Тільки в осклінні КрАЗу спостерігалось зростання цих напружень на 9%. Це пов'язано з тим, що періоди першого тону оскління для розглянутих автомобілів є меншими, ніж для розглянутого вище випадку архітектурного оскління, при однаковій для всіх випадків тривалості впливу фази стискання.

Проведено дослідження впливу тривалості дії фази стискання на НДС оскління автомобіля марки КамАЗ. У табл. 3 наведено максимальні значення напружень посередині внутрішньої поверхні скла при зменшенні тривалості фази стискання. З таблиці видно, що при зменшенні параметру τ_+ спостерігається істотне підвищення рівня максимальних значень напружень при урахуванні впливу фази розрідження. Для випадку 1,925 мс різниця складає 87%.

Таблиця 3

Напруження в шарах оскління при зміні тривалості фази стиску

Тривалість фази стиску τ_+ , мс	Напруження p_{ii} , МПа			
	без урахування стадії розрідження		із врахуванням стадії розрідження	
	min	max	min	max
7,7	-7,29	9,28	-8,52	9,28
3,85	-6,88	7,25	-9,45	7,18
1,925	-4,98	4,98	-9,33	7,21

Висновки

Проведено дослідження відгуку багатошарового оскління на дію повітряної ударної хвилі. Математична модель, що описує вплив повітряної ударної хвилі на оскління, базується на експоненціальній залежності і враховує не тільки вплив фази підвищеного тиску, а й фази розрідження. Поведінка оскління описується на основі узагальненої теорії пластин. Розв'язок рівнянь отримано аналітико-чисельним методом. Наведено результати розрахунку НДС тришарових стекел на вплив повітряної ударної хвилі без урахування та з урахуванням фази розрідження. Результати порівнювалися із даними, отриманими іншими

дослідниками. Встановлено, що для деяких типів оскління врахування фази розрідження є необхідним. Показано, що врахування впливу цієї фази може приводити до збільшення прогинів і напружень у шарах скла майже у два рази.

Запропонована методика може бути використана при проектуванні не тільки багатошарового оскління, але й інших елементів конструкцій спецтехніки МО та МНС.

Роботу виконано у рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" ("Ресурс-2").

Список використаної літератури

1. Birman V. Behaviour of laminated plates subjected to conventional blast / V. Birman, C.W. Bert // Intern. J. Impact Engineering. – 1987. – Vol. 6, № 3. – P. 145-155.
2. Teng T.L. Transient dynamic large-deflection analysis of panel structure under blast loading / T.L. Teng, C.C. Liang, C.C. Liao // JSME Intern. J. Ser. A. – 1995. – Vol. 39, № 4. – P. 591-597.
3. Turkmen H.S. Nonlinear structural response of laminated composite plates subjected to blast loading / H.S. Turkmen, Z. Mecitoglu // AIAA J. – 1999. – Vol. 37, № 12. – P. 1639-1647.
4. Математичне моделювання процесу деформування багатошарового оскління пожежних автомобілів при нестационарних навантаженнях / Є.В. Свет, О.М. Шупіков, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угримов, Н.В. Долгополова, Н.Г. Гармаш // Вестник Херсон. нац. техн. ун-та. – 2012. – № 2(45). – С. 325-329.
5. Розрахунок багатошарових елементів конструкцій атомних електростанцій при нестационарних впливах / Н.В. Сметанкіна, С.В. Угримов, Н.В. Долгополова, О.М. Шупіков // Проблемы машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 41-51.
6. Smith J.L. Glazing hazard mitigation technology / J.L. Smith, B. Hall, N. Renfroe // Protective Glazing Association: 1st Annual Educational Seminar, (Washington DC, April 21-23, 1999 y.). – Washington DC, 1999.
7. Krauthammer T. Negative phase blast effects on glass panels / T. Krauthammer, A. Altenberg // Intern. J. of Impact Engineering. – 2000. – Vol. 24(1). – P. 1-17.
8. Dharani L.R. Dynamic response of laminated glass under blast loading: effect of negative phase / L.R. Dharani, J. Wei // Structures under shock and impact VIII. – 2004. – P. 181-190.
9. Wei J. Dharani. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading / J. Wei, L.R. Dharani // Intern. J. of Impact Engineering. – 2006. – Vol. 32(12). – P. 2032-2047.
10. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading / M. Larcher, G. Solomos, F. Casadei, N. Gebbeken // Intern. J. of Impact Engineering. – 2012. – Vol. 39(1). – P. 42-50.
11. Teich M. The influence of the underpressure phase on the dynamic response of structures subjected to blast loads / M. Teich, N. Gebbeken // Intern. J. of Protective Structures. – 2010. – Vol. 1(2). – D. Fay // Intern. J. of Protective Structures. – 2014. – Vol. 5 (1). – P. 1-20.
12. Саргсян А.Е. Динамика сооружений атомных станций при особых воздействиях / А.Е. Саргсян, В.Г. Бедняков, А.П. Кириллов и др. // Энергетика и электрификация. Атомные электростанции. – 1991. Вып. 6. – 48 с.
13. Бирбраер А.Н. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А.Н. Бирбраер, С.Г. Шульман. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 250 с.
14. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
15. Kinney G.F. Explosive Shocks in Air, The Macmillan Company. – New York, 1962. – P. 75.
16. Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC-3-340-02 [5 December 2008]. Superseding: ARMY TM 5-1300. US Department of Defence Washington USA.
17. Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация / А.Н. Шупіков, Я.П. Бузько, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угримов. – Харьков: Изд-во ХНЭУ, 2004. – 252 с.
18. Ugrimov S.V. Layered orthotropic plates. Generalized theory / S. V. Ugrimov, A. N. Shupikov // Composite Structures. – 2015. – Vol. 129, № 1. – P. 224-235.
19. Григолюк Э. И. Теория вязкоупругих многослойных оболочек с жестким наполнителем при конечных прогибах / Э. И. Григолюк, П. П. Чулков // Журн. прикладной механики и техн. физики. – 1964. – № 5. – С. 109-117.
20. Сметанкіна Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек / Н. В. Сметанкіна. – Харьков: Миськдрук, 2011. – 376 с.
21. High-order theory of multilayer plates. The impact problem / A.N. Shupikov, S.V. Ugrimov, A.V. Kolodiazhny, V.G. Yareschenko // Intern. J. of Solids and Structures. – 1998. – Vol. 35, № 25. – P. 3391-3404.
22. Сметанкіна Н.В. Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багатошарового оскління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях / Н.В. Сметанкіна, О.М. Шупіков, С.В. Угримов // Вестник Херсон. нац. техн. ун-та. – 2016. – Вып. 3(58). – С. 408-413.