

*С.П. Яцишин, М.М. Семерак, І.П. Кравець  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## **ПІДВИЩЕННЯ ВИБУХОБЕЗПЕКИ ПАСАЖИРСЬКИХ ЛІТАКІВ**

У праці вивчено шляхи підвищення експлуатаційної безпеки пасажирських літаків. При цьому, в основу розгляду покладено оцінювання механічних навантажень, що виникають в корпусі й обшивці літака під час польоту, а також під дією слабого вибуху в салоні. Останній може бути наслідком нещасного випадку або терористичної атаки в повітрі. Конструктивні елементи спеціальної технології виготовлення, зокрема нанотехнологій, спроможні суттєво підвищити рівень вибухобезпеки пасажирських літаків

**Ключові слова:** вибухобезпека, літак, конструктивні елементи обшивки і корпусу

**Актуальність праці.** Системи автоматичного захисту апаратів і технологічних устав промисловості, включаючи системи пригнічення вибуху на його ранніх стадіях, передбачають сукупність давачів та виконавчих елементів, об'єднаних в одну схему, що діють за певним алгоритмом. Подібні схеми в сучасних умовах реалізуються на мікропроцесорному рівні і діють в межах стандартного інтерфейсу типу RS-232.

На даний момент не існує систем автоматичного захисту сучасних пасажирських лайнерів, що передбачають пригнічення здійснюваного терористом вибуху в салоні. Це зумовлене новітніми аспектами боротьби з тероризмом, за якими ефективна робота служби безпеки на етапі попереднього огляду запобігає внесенню до салону вибухових зарядів типу гранат з їх вражаючими осколками і вибух може бути спричинений рідкими займистими речовинами, створеними безпосередньо у салоні лайнера. Їх об'єм – до 1 л, що близько до 0,2 кг вибухівки у тротиловому еквіваленті.

У критичних ситуаціях, а до такої можна віднести здійснюваний терористом вибух невеликого заряду вибухової речовини, засоби захисту повинні автоматично і достатньо швидко видати сигнал керування, завдяки чому здійснити аварійне скидання продуктів згорання вибухівки. У цьому випадку можна спрогнозувати цілісність конструкції лайнера, як таку, що зрештою вбереже його від падіння, зумовленого втратою аеромобільних властивостей. У такому разі конструкція лайнера повинна бути підсилена практично без підвищення його власної ваги.

Мета праці – підвищення живучості лайнера при вибуху шляхом внесення необхідних змін у його конструкцію, включно з системою автоматичного захисту, в результаті вивчення процесів руйнування літака із середини під дією ударної хвилі.

**Теоретичні й експериментальні дослідження.** Деякі аспекти поставленої проблеми уже обговорювались [1] і стосувались залучення оптичних пірометрів у схемах пригнічення вибуху виробничих устав. Можливість створення подібних схем у складі автоматичних систем протидії терористичним атакам у повітрі описана у [2].

Запрограмований належним чином мікропроцесор, у режимі виникнення аварійної ситуації, коли на вхід давача поступив оптичний сигнал спрацювання, зумовлений початковими стадіями вибуху, видає через USB-порт команду спрацювання до виконавчих елементів. Такими можна вважати: 1) піропатрон з електричним запаленням, що дозволяє прочинити заслінку у корпусі літака (у першому наближенні, це двері для посадки пасажирів) у момент, що передусє проходженню вибухової хвилі, і тим самим частково погашає її руйнівну силу; 2) електрогідропривод повороту зазначеної заслінки з метою повторної герметизації лайнера протягом декількох секунд; 3) електропривод закривання та блокування дверей пілотної ка-

біни і пасажирського салону з метою безпеки та уникнення руйнування електронних засобів управління.

Для ефективного підвищення живучості лайнера слід чітко усвідомлювати характер процесів [3], що протікають у салоні літака при вибуху. З точки зору пожежної теплофізики сам вибух вважається адіабатним процесом розширення газу. Виходячи з кратності об'ємів утвореного газу і вихідної рідини  $V_g/V_l=500$ , за вихідного об'єму рідини – 1 л об'єм продуктів згорання може становити 500 л або  $0,5 \text{ м}^3$ , тобто збільшення стосовно об'єму салону неістотне. Тоді руйнування спричинене лише дією ударної хвилі.

При детальнішому розгляді дії вибуху зауважимо збільшення чисельника формули Клайперона - Клаузіуса:

$$\frac{pV}{T} = \text{Const}, \quad (1)$$

де  $p$  – тиск,  $\text{кг/см}^2$ ;  $V$  – об'єм,  $\text{м}^3$ ;  $T$  – температура, К; внаслідок чого для збереження сталості виразу зростає температура. Реально, збільшенню тиску у хвилі на порядок відповідає збільшення температури від 300 К до 3000 К. Формується сферична ударна хвиля, що поширюється з надзвуковою швидкістю по салону. Критичний удар хвилі реалізується, коли вона досягає найближче розташованої ділянки стінки салону.

У теоретичному плані належить розв'язати нелінійну нестационарну теплотехнічну задачу поширення ударної хвилі по салону та її дії на несучі конструктивні елементи корпусу, стосовно яких належить вирішити аналогічну задачу дії імпульсного механічного навантаження на межі міцності. Підкреслимо саме на межі міцності, адже при польоті, до прикладу на висоті 11 км, де атмосферний тиск становить 20% від номінального значення  $1 \text{ кг/см}^2$ , при площі дюралюмінієвого листа  $2 \times 2 \text{ м}^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2$ , на згаданий лист діє сила  $4 \cdot 10^4 \text{ см}^2 (1 - 0,2) 1 \text{ кг/см}^2 = 32000 \text{ кг}$ , спрямована перпендикулярно площині листа. Свідченням цьому є відрив листа, що стався у квітні 2011 р. у літаку Боїнг-737 під час польоту, коли виникла аварійна ситуація на борту.

Незалежно від спрацювання системи пригнічення вибуху у всіх випадках під час вибуху деформується корпус літака, зовнішня обшивка якого kleпана з великої кількості листів дюралюмінію розмірами  $\sim 2 \times 2 \text{ м}^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2$ . У лінійному наближенні її можна розглядати, як систему послідовно з'єднаних заклепками одномірних листів. Деформування першого з них відбувається, коли ударна хвиля досягає обшивки; а усі інші листи є нерухомими, як і стикові заклепки. Стосовно зазначеного листа це дає змогу скористатися з результатів розв'язку відомої у математичній фізиці задачі поперечних коливань струни  $U(x,t)$ , що описується хвильовим рівнянням гіперболічного типу

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial X^2},$$

де  $x$  – поперечне зміщення;  $a^2 = F/\rho$  ( $F$  – сила, що діє на лист;  $\rho$  – лінійна густина матеріалу листа). Зазначене порівняння корпусу літака зі струною, як об'єктів прикладення сили, можливе, коли під поперечним переміщенням приймаємо поперечне переміщення достатньо тонкої стінки корпусу літака у результаті дії на неї сферичної ударної хвилі, а сам вибух відбувся на (або дещо вище) осьовій лінії корпусу.

Шукана функція розв'язку повинна задовольняти граничним умовам, які визначають, що діється на кінцях, та початковим умовам, що описують вихідний стан об'єкта. Разом це формує поле крайових умов, які у нашому випадку є такими:

$$U(0,t) = 0; U(l,t) = 0 \quad U(x_0;t) = \varphi(x_0;x) = \varphi_0 \exp\left[-\frac{x_0-x}{x_0}\right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial U(x_0;0)}{\partial t} = B \quad \text{при } t=0 \quad \text{та } 0 \quad \text{при } t=C; \quad x_0 \in 0;l$$

Зрозуміло, функція  $\varphi_0$  задається потужністю вибуху  $P - \varphi_0 = kP^{1/3}$ , де  $k$  – стала.

До прикладу, розглянемо конструкцію реального пасажирського літака типу АН-140. Дизайн салону включає крісла з компонованням 2+2 та проходом посередині. У поперечному перерізі літак – двоярусний, причому сам салон розміщено зверху, а у приміщенні під підлогою знаходиться багажний відсік. Скоріш за все, вибух може статися у зоні проходу, тобто по осі, літака, що відповідає осі циліндра або буде зміщеним стосовно цієї осі угору. Відповідно, критична точка дії ударної хвилі, як наслідку вибуху, що переміщується з надзвуковою швидкістю (до 5 км/год), знаходиться у верхній частині корпусу літака, що вимагає вжиття заходів щодо вибіркового зміцнення.

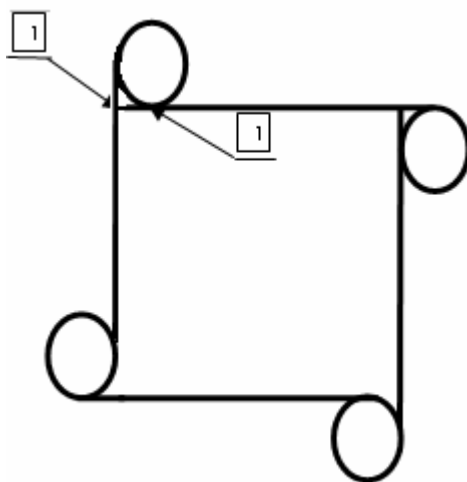
Унаслідок ударної дії хвилі зміщення елемента корпусу відбувається з силою, основна компонента якої є радіальною, принаймні, для критичного перерізу, розташованого в зоні вибуху. За для листа найгірших умов ударна хвиля вдаряє посередині листа довжиною 2 м, пройшовши близько 4 м відстані і діючи на заклепки під певним кутом; тоді можна оцінити тангенціальну силу  $F_T$ , що діє на одну заклепку:  $F_T/F_P = ? = 0,25$ . Skorистаємось даними [4] вимірювань тиску при проходженні ударної хвилі, за якими він посилюється в 100 разів від вихідного тиску 0,04 атм. (кГ/см<sup>2</sup>), досягаючи 40 атм.; виходячи з формули Клайперона – Клаузіуса та даних температурних вимірювань у фронті ударної хвилі, цей тиск становить 10 кГ/см<sup>2</sup> за тривалості дії фронту – 0,6 мкс.

При цьому, створюється імпульс:  $pSt = 0,25 \times 10 \text{ кГ/см}^2 \times 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \times 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ с.} = 0,06 \text{ кГ} \cdot \text{с}$ . Зазначений імпульс прикладається приблизно до 300 заклепок, а на одну заклепку вагою 0,01 кГ діє імпульс  $\sim 0,0002 \text{ кГ} \cdot \text{с}$ . Це дає змогу оцінити тангенціальну компоненту швидкості переміщення листа, що сприяє зрізанню головок заклепок і, таким чином, порушенню цілісності літака:  $V_m = 0,0002 \text{ кГ} \cdot \text{с} : 0,01 = 0,02 \text{ м/с}$ , а також отримане зразком прискорення:  $a = 0,02 \text{ м/с} : 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ с.} = 3,3 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2 = 3,4 \cdot 10^3 \text{ g}$ . Таке прискорення можна контролювати з допомогою ударного обладнання віброметрії [5].

Настільки значні прикладені зусилля на фоні короткочасного підвищення температури вимагають правильного добору конструктивних матеріалів у вигляді декількох тонких шарів спеціальних захисних матеріалів. Може виявитись достатнім встановити на шляху ударної хвилі ударостійкий матеріал або, ще краще, матеріал з максимальною ударною в'язкістю. Таким матеріалом можна [6] вважати аморфні стопи, здатні витримувати нетривалий час механічні напруження, що досягають межі міцності завдяки їх пружно-в'язкому деформуванню. Звичайно, області ними склепіння корпусу достатньо дорого. Проте, такі матеріали уже давно розглядались, як засоби екранування зовнішньої електромагнітної радіації в авіа- та космобудуванні. Іншим варіантом застосування конструкційних матеріалів для обкладення склепіння корпусу – є наноматеріали у вигляді вуглецевих нанотрубок. Їхня вартість при поставленій на потік технології виготовлення за даними фірми Bayer (Німеччина) [8], яка планує поставку до чотирьох тон нанотрубок на рік, знижується на порядок і становить близько 10 USD/грам. Механізм дії ударної хвилі на такий конструктивний матеріал велими цікавий з точки зору традиційної механіки. Так, нановолокно, що підлягає дії зусиль розриву у поздовжньому напрямку внаслідок удару вибухової хвилі, за даними [7] змінює власну структуру таким чином, що потовщується в місці дії екстремальних зусиль на відміну від макрозразків, які у цьому випадку витоншуються, формуючи шийку обриву.

Можна рекомендувати застосування пластикових макрокапсул у межах обшивки: тут завдяки формі упаковки може додатково проявлятися ефект механічного демпфування нас-

лідків дії хвилі [7]. За результатами досліджень авторів, ефект форми стає максимальним при виготовленні об'ємних капсул у вигляді куба, кожна грань якого формується у вигляді окремої загнутої пелюстки, що виступає назовні куба, формуючи завиток. Куб виготовляють зварюванням місць згину однієї пелюстки та незагнутого протилежного краю іншої пелюстки, причому з використанням двох поздовжніх швів (рис.1). Обшивка, виготовлена з застосуванням вказаного наповнювача, витримує короточасні зусилля, на два порядки вищі порівняно зі звичайною обшивкою і на один порядок, порівняно з кубом, виготовленим зварюванням з використанням одного поздовжнього шва.



*Рис. 1. Об'ємна капсула (вигляд збоку): 1 – місця зварювання*

**Висновок.** Підвищення рівня вибухобезпеки літака потребує впровадження низки конструктивно-технологічних заходів на етапі виготовлення / переоснащення літака із застосуванням сучасних конструктивних матеріалів (наноматеріали або спеціальні конструктивно-технологічні наповнювачі обшивки), спроможних суттєво підвищити міцність корпусу при дії імпульсних знакозмінних навантажень ударної хвилі, що накладаються на значні статичні зусилля, зумовлені різницею тисків ззовні та зсередини корпусу літака.

#### Список літератури:

1. Стадник Б.І., Яцишин С.П., Микитин І.П., Ратушний Р.Т. Пірометричні перетворювачі у автоматичних установках пригнічення вибуху // Пожежна безпека. – 2007. – № 10. – С. 70-75.
2. Яцишин С.П., Кушнір А.П. // Пірометрические преобразователи в автоматических установках подавления взрыва. – Вопросы оборонной техники. – Сер.16: Технические средства противодействия терроризму. – № 1-2. – 2008. – С. 80-81.
3. Башкирцев М.П. и др. Основы пожарной теплофизики. Москва: Стройизд. – 1984. 200 с.
4. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. Москва: Госиздат.физ.-мат. лит. – 1963. – 175 с.
5. Иорис Ю.И. Виброметрия. Москва: Машгиздат. – 1963. – 771 с.
6. Аморфные неметаллические сплавы / Немошкаленко В.В., Романова А.В., Ильинский А.Г. и др. – К.: Наукова думка, 1987. – 246 с.
7. [www.exeter.ac.uk](http://www.exeter.ac.uk)
8. [www.bayer.de](http://www.bayer.de)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОСТИ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ**

В работе изучены пути повышения эксплуатационной безопасности пассажирских самолетов. При этом, в основу рассмотрения положено оценку механических нагрузок, возникающих в корпусе и обшивке самолета во время полета, а также под действием слабого взрыва в салоне. Взрыв может оказаться следствием несчастного случая либо террористической атаки в воздухе. Наполняющие конструктивные элементы специальной технологии изготовления, в частности нанотехнологий, способны существенно повысить уровень взрывобезопасности пассажирских самолетов.

**Ключевые слова:** взрывозащищенность, самолет, конструктивные элементы обшивки и корпуса

*S.P.Yatsyshyn, M.M.Semerak, I.P.Kravets*

## **INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF EXPLOSION PROTECTED PASSENGER AIRPLANES**

In this paper we explore ways to improve operational safety of passenger aircraft. In this case, we propose the consideration of mechanical loads occurring in the hull and paneling of aircraft during the flight as well as under the effect of a weak inner explosion. The latter may be a consequence of accidents or terrorist attacks in the air. The constructive elements of the special manufacturing technology particularly nanotechnology can significantly increase the level of explosion protection of passenger aircraft.

**Key words:** explosion protection, airplane, structural components of skin and body

