

УДК 623.438 (001.57)

*Чепков І.Б. д-р техн. наук; Бісик С.П., Корбач В.Г. канд. техн. наук;  
Голуб В.А. канд. техн. наук*

### **ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНО-ХВИЛЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДНИЩА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

Значна частина бойових пошкоджень бронетанкового озброєння та військової техніки спричинена підривами на фугасних протитанкових мінах та саморобних вибухових пристроях [1], що викликає необхідність забезпечення захисту екіпажів від уражаючих факторів вибуху.

Частково виконати це завдання можливо теоретичним й експериментальним вивченням ударно-хвильового навантаження (УХН) складних конструкцій, та встановлення залежностей між конструктивними параметрами для їх оптимального вибору в конструкції днища транспортного засобу (ТЗ). Експериментальний метод є, безумовно, достовірнішим, однак, не є повністю універсальним через неможливість оцінки протимінної стійкості ТЗ на етапах ескізного і технічного проектування. Тому, перед прийняттям проектних рішень необхідно проводити чисельні дослідження із варіюванням розмірів конструкції ТЗ.

Використання числового моделювання дозволяє в стислі терміни і з найменшими витратами вирішувати завдання оптимізації цих конструкцій із застосуванням натурного експерименту як перевірконого. Одним з поширених програмних продуктів для вирішення подібних завдань є пакет LS-DYNA [2].

Із використанням LS-DYNA виконанні розрахунки УХН закріпленої по контуру пластини та проведено порівняння з експериментальними даними [3]. Експериментальна установка та схема реєстрації УХН пластини наведені на рис. 1.

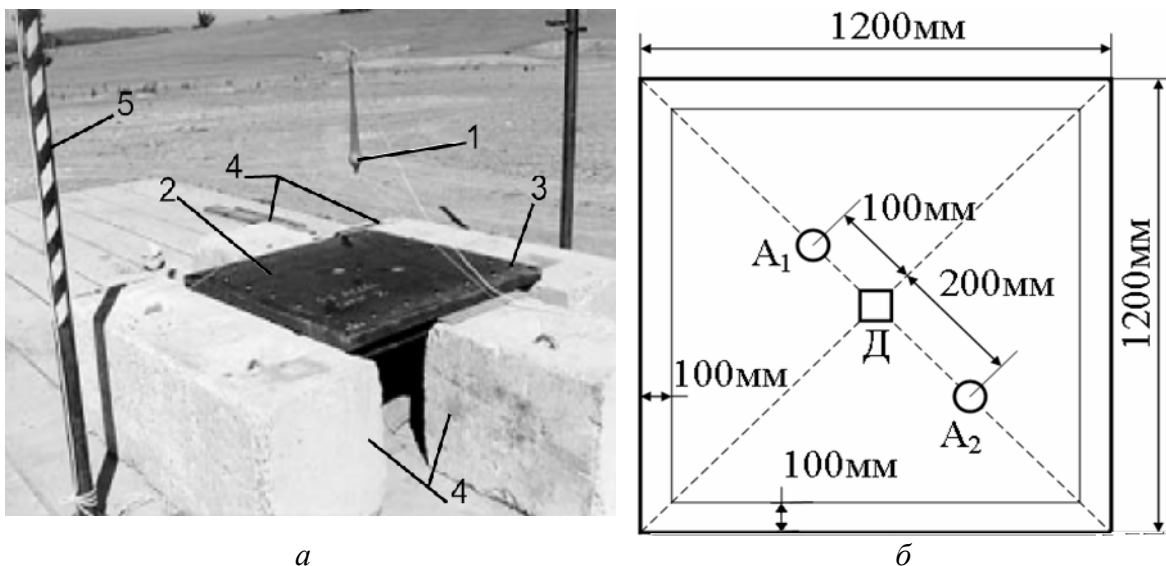


Рис. 1. Експериментальна установка (а) та схема розташування точок реєстрації (б) ударно-хвильового навантаження пластини:

1 – вибухова речовина, 2 – пластина, 3 – елементи кріплення пластини, 4 – бетонні блоки, 5 – кронштейн для кріплення вибухової речовини, Д – точка реєстрації динамічного переміщення, А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> – точки реєстрації прискорення

Стальна пластина 1200x1200x5 мм встановлена на залізобетонних блоках і закріплена по периметру. Вибухова речовина (ВР) – пентоліт, масою 250г, ініціюється на відстані 250, 400, 500мм до пластини. Площа поверхні навантаження - 1000x1000 мм. Характеристики матеріалу пластини наведені в табл. 1. Детальний опис експерименту та характеристик виміральної апаратури для реєстрації УХН приведений в [3].

*Таблиця 1*

| Характеристика                 | Значення |       |
|--------------------------------|----------|-------|
|                                | пластина | днище |
| Модуль пружності, ГПа          | 203      | 200   |
| Коефіцієнт Пуассона            | 0,3      | 0,3   |
| Границя плинності, МПа         | 270      | 980   |
| Дотичний модуль пружності, МПа | 470      | 470   |

Розмірність скінчено-елементної (СЕ) моделі, що безпосередньо визначає точність моделювання, визначена шляхом порівняння розрахункових значень динамічного переміщення точки Д з експериментальними (табл. 2) при відстані між пластиною та зарядом ВР 400 мм. Для подальших розрахунків прийнята СЕ-модель з умовним позначенням 2, що забезпечує відносну похибку ( $\Delta$ ) в розрахунках 0,3% та незначне відносне збільшення часу вирішення завдання.

*Таблиця 2*

Вплив розмірності СЕ-моделі на розрахункове значення максимального динамічного переміщення точки Д

| Умовне позначення | Кількість елементів, шт. | Відносне збільшення часу, разів | Максимальне переміщення точки Д, мм |              | $\Delta$ , % |
|-------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
|                   |                          |                                 | експериментальне                    | розрахункове |              |
| 1                 | 43920                    | 12,1                            | -36,0                               | -36,4        | 1,0          |
| 2                 | 19760                    | 6,0                             |                                     | -35,9        | 0,3          |
| 3                 | 11280                    | 3,6                             |                                     | -30,6        | 15,0         |
| 4                 | 7344                     | 2,4                             |                                     | -29,6        | 17,8         |
| 5                 | 5200                     | 1,8                             |                                     | -28,0        | 22,2         |
| 6                 | 3080                     | 1                               |                                     | -25,0        | 30,6         |

Результати експерименту та результати числового моделювання з вибраною СЕ-моделлю приведені в табл. 3. Аналіз отриманих результатів вказує на високу точність розрахунку динамічного прогину пластини при відстані до ВР більше 400 мм. Зростання відносної похибки розрахунків при відстані 250 мм до ВР пояснюється недосконалістю моделі визначення питомого імпульсу потоку повітря за фронтом ударної хвилі [4].

Авторами проведено дослідження поведінки конструкції днища ТЗ при УХН вибухом напівсферичного заряду тринітротолуолу (ТНТ) масою 8 кг. Днище ТЗ ідеалізується як пластинчата конструкція без прикріпленого внутрішнього обладнання. Геометрична модель та розрахункова схема конструкції днища представлена на рис. 2. В процесі дослідження варіювалися значення таких геометричних параметрів: товщини нижньої ( $h_B$ ) та верхньої ( $h_A$ ) пластин, бокових стінок ( $h_1$ ) та відстані між пластинами ( $g_{AB}$ ).

Експериментальні дані та результати числового моделювання УХН пластини

| Відстань від центру заряду ВР до пластини | Максимальне переміщення точки Д, мм |              |      | Максимальне прискорення, g |              |      |                      |              |      |
|---|-------------------------------------|--------------|------|----------------------------|--------------|------|----------------------|--------------|------|
|   |                                     |              |      | точка А <sub>1</sub>       |              |      | точка А <sub>2</sub> |              |      |
|   | експериментальне                    | розрахункове | Δ, % | експериментальне           | розрахункове | Δ, % | експериментальне     | розрахункове | Δ, % |
| 500                                       | -33                                 | -33,1        | 0,3  | 14657                      | 17857        | 21,8 | 14748                | 11609        | 21,2 |
| 400                                       | -36                                 | -35,9        | 0,3  | 17529                      | 18375        | 4,8  | 15052                | 16794        | 11,5 |
| 250                                       | -35                                 | -42,4        | 21,1 | 40969                      | 50612        | 23,5 | 30049                | 25405        | 15,4 |

Характеристики матеріалу, вибрані для моделювання, представлені в табл. 1. Матеріал днища описується моделлю пружно-пластичного середовища [5-6].

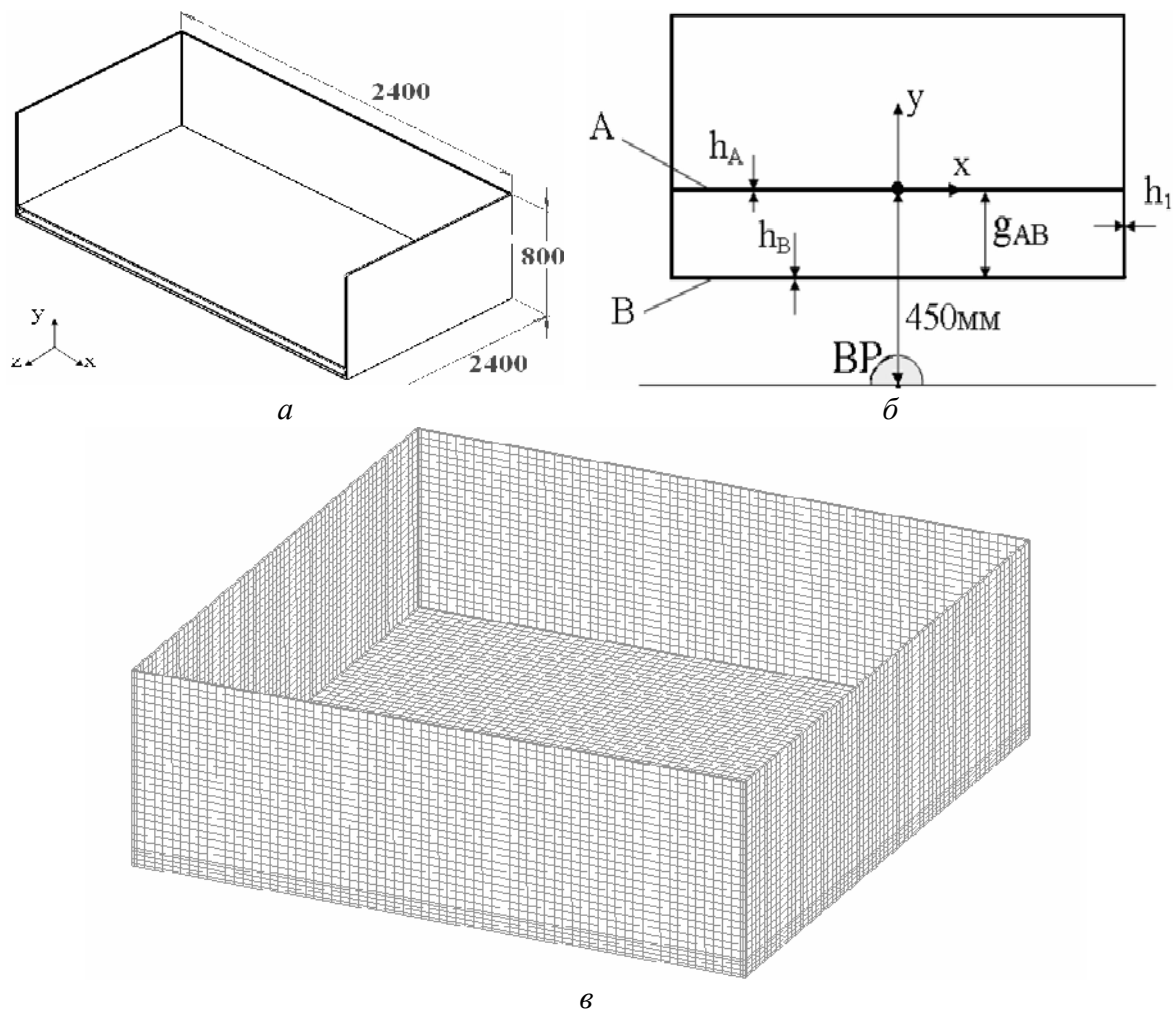


Рис. 2. Геометрична модель та розрахункова схема подвійного днища: а - тривимірний геометричний моделювання, б - поперечний переріз, в - скінченно-елементна модель, А - верхня пластина, В - нижня пластина

УХН задане у вигляді функції тиску від часу. Для застосування даного підходу в LS-DYNA реалізована спеціальна функція CONWER. При цьому тиск, що діє на конструкцію, розраховується по емпіричних залежностях, отриманих на основі експериментальних даних. Застосування вибраної функції дозволяє моделювати УХН з достатньою точністю без проведення трудомістких розрахунків детонації вибухової речовини та розповсюдження ударної хвилі.

При проведенні розрахунків було прийнято, що верхні вузли бокових поверхонь зафіксовані.

Результати моделювання, приведені в табл. 4, відповідають максимальним значенням переміщення, швидкості та прискорення для центрального вузла на тильній поверхні відповідної пластини. Слід зазначити, що при зміні одного з геометричних розмірів решта геометричних розмірів ( $h_A$ ,  $h_B$ ,  $h_1$ ,  $g_{AB}$ ) дорівнює 10 мм. При зміні геометричних розмірів  $h_A$ ,  $h_B$ ,  $h_1$  (варіанти №8-19)  $g_{AB}$  - дорівнює 50 мм.

Таблиця 4

Результати числового моделювання УХН днища

| № числового експерименту | Параметр, що варіюється та його значення, мм |                | Переміщення, мм |     | Швидкість, м/с |      | Прискорення, $10^6$ м/с <sup>2</sup> |      |      |
|--------------------------|--|----------------|-----------------|-----|----------------|------|--------------------------------------|------|------|
|                          |  |                | A               | B   | A              | B    | A                                    | B    |      |
| Одинарне днище           |  |                |                 |     |                |      |                                      |      |      |
| 1                        | Товщина днища                                | 20             | 125             | -   | 82,7           | -    | 0,85                                 | -    |      |
| 2                        |  | 30             | 78              | -   | 52,8           | -    | 0,49                                 | -    |      |
| 3                        |  | 40             | 64              | -   | 38,3           | -    | 0,46                                 | -    |      |
| Подвійне днище           |  |                |                 |     |                |      |                                      |      |      |
| 4                        | $g_{AB}$                                     | 40             | 166             | 157 | 158            | 213  | 0,85                                 | 2,13 |      |
| 5                        |  | 50             | 167             | 162 | 155            | 219  | 1,9                                  | 2,01 |      |
| 6                        |  | 60             | 165             | 175 | 124            | 229  | 0,7                                  | 1,8  |      |
| 7                        |  | 80             | 161             | 213 | 162            | 247  | 1,31                                 | 1,92 |      |
| 8                        | $h_A$  | $g_{AB}=50$ мм | 20              | 113 | 136            | 93,6 | 220                                  | 0,8  | 1,22 |
| 9                        |  |                | 25              | 96  | 119            | 65   | 221                                  | 3,59 | 2,33 |
| 10                       |  |                | 30              | 82  | 111            | 55,9 | 224                                  | 3,0  | 2,04 |
| 11                       |  |                | 40              | 61  | 96             | 45   | 223                                  | 0,38 | 2,02 |
| 12                       | $h_B$  | $g_{AB}=50$ мм | 20              | 96  | 121            | 55,6 | 106                                  | 0,83 | 0,99 |
| 13                       |  |                | 25              | 86  | 98             | 44   | 82,7                                 | 0,59 | 0,87 |
| 14                       |  |                | 30              | 73  | 79             | 32,7 | 67,1                                 | 0,45 | 0,61 |
| 15                       |  |                | 40              | 44  | 62             | 35,7 | 45,7                                 | 0,28 | 0,15 |
| 16                       | $h_1$  | $g_{AB}=50$ мм | 20              | 118 | 128            | 68,8 | 181                                  | 4,58 | 2,4  |
| 17                       |  |                | 25              | 120 | 132            | 82   | 182                                  | 1,57 | 2,4  |
| 18                       |  |                | 30              | 129 | 130            | 96,5 | 182                                  | 0,46 | 2,17 |
| 19                       |  |                | 40              | 148 | 158            | 123  | 214                                  | 4,5  | 4,2  |

На рис. 3 приведено графіки вертикального переміщення для центрального вузла тильної сторони пластини А (варіанти №2, 8, 12). Приведені графіки є характерними для всіх варіантів конструкції. Відмінності спостерігаються тільки у зміні величини періоду та амплітуди коливань.

Збільшення товщини бокових стінок призводить до зменшення динамічного прогину пластини на незначну величину, але є найбільш ефективним порівняно з

іншими варіантами конструкції днища. При цьому мінімальне значення динамічного прогину має варіант №16.

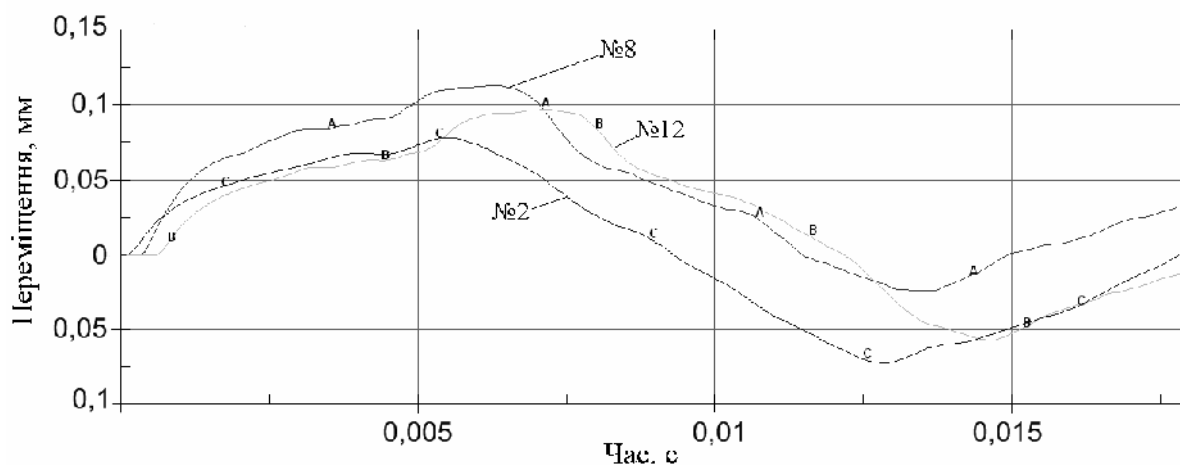


Рис. 3. Динаміка вертикального переміщення центрального вузла тильної сторони пластини А для різних варіантів конструкції днища

### **Висновки:**

1. Порівняння отриманих результатів числового моделювання УХН закріпленої по контуру пластини з експериментальними даними свідчить про можливість використання розглянутого методу для дослідження складних конструкцій транспортних засобів, в тому числі з енергопоглинаючими та підсилюючими (конструктивно ортотропними) елементами.

2. При умові динамічного контакту пластин величина імпульсу прискорення на тильній стороні верхньої пластини зростає. Для її зменшення необхідне використання енергопоглинаючих елементів між пластинами.

3. Для зменшення динамічного прогину подвійного днища доцільно збільшувати товщину нижньої пластини, що при однаковій масі днища дає кращий результат порівняно з аналогічним збільшенням товщини верхньої пластини.

4. Значний вплив на величину динамічного прогину днища має товщина бокових стінок, яку слід вибирати у 1,5-2 рази більшою за товщину пластини.

**Література:** 1. Денисенко А.М. Методика оценки защищающей способности системы активной противоминной защиты легких бронированных машин // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический сборник. – К.: НТЦ АСВ. – 2007. – Вып. №2. – С.3-8. 2. LS-DYNA keyword user's manual Version 970. – Livermore: LSTC, 1998 –498с. 3. Boyd S.D. Acceleration of a plate subjected to explosive blast loading – trial results // Aeronautical and Maritime Research Laboratory – 2000. 4. Селиванов В.В. Взрывные технологии: Учебник для ВТУЗов / Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. Под общей ред. В.В.Селиванова. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648с. 5. Муйземнек А.Ю. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа: учебное пособие / А.Ю.Муйземнек. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 152с. 6. Муйземнек А.Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие / А.Ю.Муйземнек, А.А. Богач. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Denisenko A.M. Metodika ocenki zawiwajuwej sposobnosti sistemy aktivnoj protivominnoj zawity legkih bronirovannyh mashin // Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie. Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij sbornik. – K.: NTC ASV. – 2007. – Vyp. №2. – S.3-8. 2. LS-DYNA keyword user's manual Version 970. – Livermore: LSTC, 1998 –498с. 3. Boyd S.D. Acceleration of a plate subjected to explosive blast loading – trial results // Aeronautical and Maritime Research Laboratory – 2000. 4. Selivanov V.V. Vzryvnye tehnologii: Uchebnik dlja VTUZov / Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. Pod obwej red. V.V.Selivanova. – M.: izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2008. – 648s. 5. Mujzemnek A.Ju. Opisanie povedenija materialov v sistemah avtomatizirovannogo inzhenerного analiza: uchebnoe posobie / A.Ju.Mujzemnek. – Penza: Informacionno-izdatel'skij centr PGU, 2005. – 152s. 6. Mujzemnek A.Ju. Matematicheskoe modelirovanie processov udara i vzryva v programme LS-DYNA: uchebnoe posobie / A.Ju.Mujzemnek, A.A. Bogach. – Penza: Informacionno-izdatel'skij centr PGU, 2005. – 106s.

Чепков И.Б., Бисык С.П., Корбач В.Г., Голуб В.А.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ДНИЩА  
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Приведены результаты численного моделирование ударно-волнового нагружения пластинчатого днища транспортного средства. Предложенный метод может быть использован для исследования сложных конструкций транспортных средств, в том числе с элементами усиления и энергопоглощающими элементами.

Chepkov I.B., Bisyk S.P., Korbach V.G., Golyb V.A.

**NUMERICAL SIMULATION OF SHOCK LOADING OF VEHICLE BOTTOM**

This article presents results of numerical simulation of shock loading of lamellate vehicle bottom. The introduced method can be used for research of the composite constructions of vehicle, including with energy-absorbing devices and devices of strengthening.

---