

А.В.Ковтун<sup>1</sup>, В.О.Табуненко<sup>2</sup>, С.І.Нестеренко<sup>3</sup>,  
О.В.Іванченко<sup>1</sup>

### ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ РЕЗЕРВУАРІВ З РІДИНОЮ ПРИ ЇХ БЕЗПАРАШУТНОМУ СКИДАННІ

<sup>1</sup>Національна академія Національної гвардії України,  
майдан Захисників України, 3, 61001, Харків, Україна; e-mail: kav-60@ukr.net  
<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба,  
вул. Сумська, 77/79, Харків, 61023, Україна; e-mail: tabunenko55@ukr.net  
<sup>3</sup>Харківський національний авіаційний університет,  
вул. Чкалова 17, Харків, 61070, Україна; e-mail: nesterenko.geo@gmail.com

**Abstract.** The results of theoretical and experimental studies of determining the stresses in the elastic soft tanks during their non-parachute throwing off from aircraft for the optimal design of the shape and structure of tanks are presented. The stated problem is related to determining the stress-strain state of the soft tanks (shells) under a complex load (external - impact on the earth's surface, and internal - the direct hydraulic shock of liquid in the tank when it hits the earth's surface). The design of elastic tanks with liquid for their parachute-free dropping from aircraft and the model for calculating their stress-strain state are proposed.

**Key words:** elastic tank with liquid, hydraulic shock, structural strength, stress-strain state, parachute-free throwing off.

#### Вступ.

Одним із проблемних питань забезпечення військ паливом при веденні військових дій є доставка пального до бойових порядків підрозділів та проведення заправлення військової техніки в мінімальні терміни [5].

Оперативна доставка пального у райони проведення бойових операцій можлива шляхом скидання резервуарів з паливом з літальних апаратів. Однак, скидання вантажів на парашутах знижує точність їх влучення у потрібне місце, підвищує вартість доставки, дозволяє визначити місцезнаходження військових підрозділів [5, 19].

Практика застосування безпарашутного скидання вантажів з літальних апаратів показала низьку ефективність такого способу доставки вантажів, зумовлену низькою міцністю існуючих конструкцій резервуарів (100% резервуарів розбиваються при падінні з висот більше 200 м).

Тому актуальним є питання розробки нових способів забезпечення військ паливом і технічних засобів, що реалізують ці способи.

Відсутність засобів безпарашутного забезпечення військ паливом пов'язана з малою кількістю наукових досліджень з визначення напружено-деформованого стану (НДС) м'яких резервуарів з рідиною при їх безпарашутному скиданні.

Задача, що розглядається, пов'язана з визначенням НДС м'яких резервуарів (оболонки) при складному навантаженні (зовнішньому – удар по поверхні землі та внутрішньому – прямий гідроудар рідини в резервуарі при такому ударі).

Сучасні роботи по визначенню НДС резервуарів з урахуванням руху рідини в них пов'язані з дослідженнями трубопровідних систем [2, 12, 22], транспортуванням па-

льного автомобільним та залізничним транспортом [4, 8, 13, 18, 21, 24], системами забезпечення компонентами палива ракетноносіїв [1, 3, 9, 10, 23], гідравлічними випробуваннями резервуарів внутрішнім тиском [6, 7, 11], міцності тіл, що проникають у воду [16, 20].

Необхідною частиною розрахунків на міцність трубопровідних систем є розрахунок динамічних навантажень при гідравлічному ударі. Для аналізу таких систем необхідно розв'язати загальну задачу гідропружних коливань трубопроводів з рідиною. Дослідження гідравлічного удару проводиться шляхом розв'язання незалежної гідродинамічної задачі, а отримані при цьому результати на наступному кроці дослідження використовуються для розв'язання задачі визначення НДС конструкції трубопроводів.

В роботах [2, 22] розроблені математичні моделі та чисельні алгоритми дослідження нестационарних гідродинамічних процесів для визначення НДС та оцінки міцності трубопроводів з урахуванням дії на трубу внутрішнього робочого тиску.

В [7] проведено комп'ютерне моделювання НДС тонкостінної сферичної оболонки з круговим отвором, підкріпленою кільцевим включенням з іншого матеріалу, яка перебуває під дією рівномірного внутрішнього тиску. Досліджено вплив геометричних та механічних параметрів включень на процес деформування оболонки.

В роботах [4, 6, 13, 18, 21] досліджуються НДС залізничних цистерн для перевезення рідини з урахуванням розв'язку задачі гідроудару.

В [1, 3, 9, 10, 23] наведено результати моделювання НДС оболонкових конструкцій ракетної техніки та методологія експериментального дослідження впливу спектру навантаження на поведінку і втомне пошкодження паливних баків під час транспортування ракети-носія.

В [20] проведено розрахунок міцності тіл, що проникають у воду з великою швидкістю. Розглядаються процеси, що відбуваються при високошвидкісному вході тіл у воду під довільним кутом і подальшому русі у воді за інерцією. При перетині вільної поверхні води тіло отримує великі навантаження.

В [24] розглянуті варіанти зменшення коливань конструкцій з рідиною. Для зменшення коливань несучої конструкції пропонується використовувати алгоритм керування, до якого включено аналітично визначену компенсацію силової взаємодії рідини з конструкцією.

В роботах [11, 12] запропоновано нові методи визначення параметрів стиснення рідини.

Цікавими дослідженнями, що пов'язані з визначенням можливості проведення безпарашутного скидання рідини в циліндричній оболонці є теоретичні дослідження, що наведені в роботах [3, 16].

Математичну модель визначення НДС м'якої оболонки, що перебуває під дією внутрішнього тиску, наведено в [3].

Аналітичний розв'язок задачі визначення НДС м'якої оболонки при ударі по поверхні землі отримано в [1]. У цій роботі приведено розрахунок міцності м'якої еластичної циліндричної оболонки (резервуара) незначної ширини і великої довжини з заглушеними торцями, заповненої рідким чи сипучим наповнювачем, яка падає вертикально вниз з постійною швидкістю  $V$ . При ударі по поверхні землі такий резервуар здійснює коливальні рухи зі згасаючою амплітудою, під час яких змінюється тиск на його стінках.

Рівняння енергетичного методу для циліндричного елемента одиничної ширини має вигляд [16]:

$$E^{ny} = E^y,$$

де  $E^{ny}$  – енергія елемента перед ударом;  $E^y$  – енергія удару в момент, коли швидкість центру ваги елемента на першому періоді хвильового коливання дорівнює нулю.

При ударі резервуара з рідиною по поверхні землі відбуватиметься деформація його стінок у поперечному напрямку, збільшення надлишкового тиску у ньому, крім того, на резервуар будуть діяти сили інерції. Величину погонного поперечного натягу в стінках резервуара  $T$  при ударі можна визначити з виразу [16]:

$$T = \sqrt{\left[ 0,0087n^{1,36}S^2\gamma_0 \left( \frac{2\pi V}{gt_k} + 1 \right) \right]^2 - E\delta\gamma_0 A - 0,0087n^{1,36}S^2\gamma_0 \left( \frac{2\pi V}{gt_k} + 1 \right)},$$

де

$$A = 0,0172S^2n^{0,236} \left( \frac{2\pi V}{gt_k} + 1 \right) - \frac{0,072n^{0,056}V^2S}{g},$$

$S$  – периметр перерізу резервуара;  $E$  – модуль пружності матеріалу його стінок;  $\delta$  – товщина стінок;  $t_k$  – період коливань, що залежить від розмірів поперечного перерізу резервуара, модуля пружності матеріалу стінок і ступеня його заповнення;  $n$  – величина ступеня заповнення резервуара;  $g_0$  – об’ємна вага нерухомого наповнювача (рідини);  $g$  – прискорення вільного падіння;  $V$  – швидкість падіння резервуара.

Результати розрахунку величини поперечних напружень, що виникають у стінках резервуара, виготовленого з полімерного матеріалу, з рідиною місткістю 0,03 м<sup>3</sup>, при скиданні його без парашута з висоти 300 м, показують, що поперечні напруження, які виникають у його стінках при падінні, перевищують межу міцності матеріалу  $s = 4 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $[s] = 1 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> [17]), що не дозволяє скидати резервуар з рідиною з висоти 300 м.

Проведений аналіз науково-технічної літератури показав, що серед сучасних результатів досліджень НДС елементів конструкцій з рідиною при динамічних навантаженнях відсутні результати досліджень з визначення напружень в еластичних резервуарах при їх безпарашутному скиданні з літальних апаратів, а існуюча математична модель визначення НДС м’якої оболонки при ударі по поверхні землі потребує подальшого вдосконалення.

Мета статті – на основі аналізу процесів виникнення гідравлічного удару в еластичних резервуарах при їх безпарашутному скиданні запропонувати вдосконалену модель конструкції резервуара із частковим запобіганням шкідливих наслідків гідроудару.

### §1. Опис об’єкту дослідження та його моделювання.

Об’єктом дослідження є напружено-деформований стан еластичного резервуару (м’якої оболонки) з рідиною при ударі по поверхні землі в процесі безпарашутного скидання.

Для підтвердження результатів розрахунку, проведених за математичною моделлю, що наведена в роботі [16], були проведені натурні експериментальні дослідження по визначенню можливості збереження рідких вантажів при їх безпарашутному скиданні в резервуарі, що являє собою однооболонкову м’яку конструкцію із гумотканевого матеріалу, з гвинтокрила Мі-2. Результати чотирьох експериментів з безпарашутного скидання резервуарів з рідиною масою 30 кг з висоти 300 м показали, що однооболонковий резервуар розривається, збереженість рідини не забезпечується.

Причина розриву резервуара з рідиною при падінні пов’язана з сукупністю явищ, які виникають в рідині при різкій зміні швидкості руху її частинок (гідроудар) [8, 11, 12].

Визначення деформацій резервуара з рідиною при падінні зводиться до розв’язування задачі про кругове кільце, навантажене рівномірно розподіленим внутрішнім тиском.

Після падіння резервуара в момент  $t_0 = 0$  починається гальмування рідини. Однак, спочатку воно буде охоплювати тільки близькі до торців резервуара елементи рідини. Гублячи швидкість, вони будуть стискатися, при цьому діаметр відповідної частини резервуара буде збільшуватися. Довжина частини, в межах якої рідина залишилась, буде зростати до тих пір, поки фронт хвилі стискання не досягне початку резервуара ( $t_L = L_p / c$ ; де  $L_p$  – довжина резервуара;  $c$  – швидкість фронту хвилі стискання рідини). Після цього виникає зворотня хвиля розрідження. При її проходженні

тиск в перерізах резервуара буде повертатися до номінального значення. Далі процес буде продовжуватися зі змінним чергуванням інтервалів підвищення та зниження тиску.

Напруження, які викликані гідравлічним ударом, визначаються виразом [11]:

$$\sigma = \frac{\rho c V_0 R}{\delta},$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $V_0$  – початкова швидкість руху рідини в резервуарі;  $R$  – радіус резервуара.

Для зниження інтенсивності гідравлічного удару рідини в резервуарі при скиданні пропонується використовувати додаткові ємності, які дозволяють рідині перетікати з області високого тиску в область низького тиску (у зовнішню оболонку).

За результатами досліджень була запропонована конструкція резервуара (рис. 1, *a*), що містить вкладені одна в іншу еластичні оболонки (внутрішню 1 і зовнішню 2, при цьому, довжина зовнішньої оболонки більша, ніж довжина внутрішньої оболонки), внутрішня з яких призначена для заповнення рідиною. При цьому у внутрішній оболонці з торців виконані лінії послабленої міцності 3 [14].

При ударі резервуара по поверхні землі відбувається збільшення надлишкового тиску у внутрішній оболонці, що викликає розтяг її до допустимих напружень матеріалу оболонки. При цьому відбувається часткове поглинання енергії ударного впливу. При подальшому наростанні тиску у внутрішній оболонці відбувається її розгерметизація по лініях ослабленої міцності і рідина перетікає в зовнішню оболонку. У процесі перетікання рідини відбувається подальше розсіювання енергії за рахунок витікання рідини в зовнішню оболонку з подоланням атмосферного тиску і створення розтягуючих зусиль у стінках зовнішньої оболонки до припустимих величин. Положення резервуара після удару представлено на рис. 1, *б*.

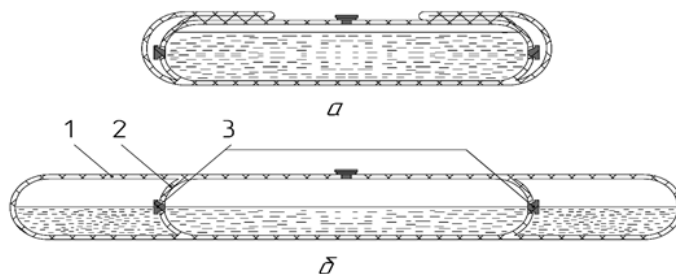


Рис. 1

Однак, експерименти не підтвердили висновок про можливість збереження рідких вантажів масою 30 кг при їх безпарашутному скиданні з висоти 300 м (резервуар розривається, збереженість рідини не забезпечується). Причина розриву резервуара полягає в тому, що процес зростання тиску рідини в середині резервуара при ударі проходить за час  $\tau < 2L_p / c$ , додаткові ємності не встигають розкритися та не забезпечують потрібного витоку в них рідини, необхідного для зниження ударної дії на конструкцію.

Для зниження інтенсивності гідравлічного удару рідини пропонується з'єднати зовнішню та внутрішню оболонки резервуара заслінкою (рис. 2). Вважаємо, що на цю заслінку діє сила тертя  $F$ .

При падінні резервуара, якщо виконується умова  $P = p_{уд} \pi R_3^2 \geq F + P_{ат}$  (де  $p_{уд}$  – ударний тиск рідини в резервуарі;  $R_3$  – радіус заслінки), почнеться процес переміщення заслінки відносно зовнішньої оболонки резервуара, з'являться додаткові ємності, які дозволяють рідині перетікати з області високого тиску в область низького тиску.

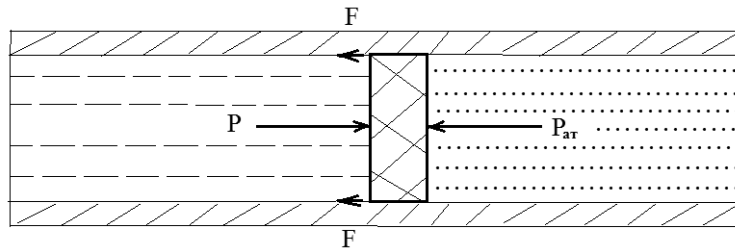


Рис. 2

Математична модель руху заслінки має вигляд

$$m_3 a_3 = P - F - P_{\text{ат}} = \pi R_3^2 (p_{\text{уд}} - p_{\text{ат}}) - F,$$

де  $m_3$  – її маса;  $a_3$  – її прискорення;  $P$  – сила гідравлічного удару;  $P_{\text{ат}}$  – сила атмосферного тиску;  $p_{\text{ат}}$  – атмосферний тиск.

Відстань, яку проходить заслінка при гідродударі, визначимо з виразу

$$L_3 = \frac{[\pi R_3^2 (p_{\text{уд}} - p_{\text{ат}}) - F] t^2}{2m_3} + V_3 t,$$

де  $V_3$  – швидкість руху заслінки;  $t$  – час.

Для теоретичного розв'язування задачі з визначення напружень, що виникають в стінках резервуара з рідиною при його безпарашутному скиданні, застосуємо математичний апарат дослідження деформування м'якої циліндричної оболонки, що навантажена рівномірним внутрішнім тиском, наведений у роботі [3]. Теоретичною базою досліджень є основні положення технічної теорії міцності м'яких оболонок, яка заснована на загальному нелінійному підході, але припускає виділення деякого основного напруженого стану і лінеаризацію системи рівнянь оболонки.

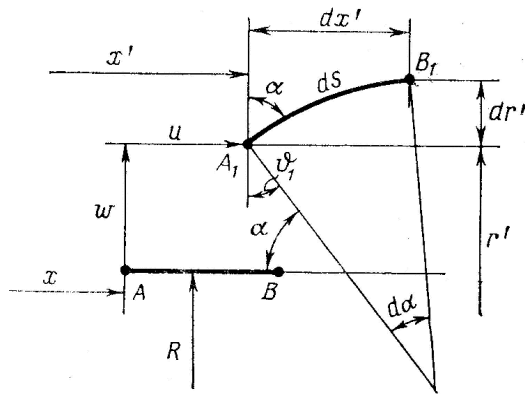


Рис. 3

Для складання математичної моделі використаємо вихідні залежності, що застосовуються для розрахунку деформування м'якої циліндричної оболонки, навантаженої рівномірним тиском.

На рис. 3 показана схема переміщення елемента оболонки в початковому  $AB$  і деформованому  $A_1B_1$  стані.

При деформації ділянки  $AB$  еластичного резервуара точка  $A$  переходить у точку  $A_1$ , одержуючи переміщення  $u, w$  відносно координати  $x$ .

Математична модель визначення НДС еластичного резервуара, навантаженого внутрішнім надлишковим змінним тиском, має наступний вигляд [3]:

$$\varepsilon_2 = \frac{w}{R};$$

$$T_1 = E\delta \left[ \frac{1 + \varepsilon_1}{1 + \varepsilon_2} - \frac{1}{(1 + \varepsilon_1)^3 (1 + \varepsilon_2)^3} \right];$$

$$T_2 = E\delta \left[ \frac{1 + \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1} - \frac{1}{(1 + \varepsilon_1)^3 (1 + \varepsilon_2)^3} \right];$$

$$\frac{dT_1}{dx} + (T_1 - T_2) \frac{1 + \varepsilon_1}{1 + \varepsilon_2} \frac{1}{R} \cos \alpha = 0;$$

$$\frac{dT_1}{dx} + (T_1 - T_2) \frac{1 + \varepsilon_1}{1 + \varepsilon_2} \frac{1}{R} \sin \alpha = \frac{p_{уд}}{T_1} (1 + \varepsilon_1);$$

$$\frac{d\alpha}{dx} - (1 + \varepsilon_1) \cos \alpha = 0; \quad \frac{du}{dx} + (1 + \varepsilon_1) \sin \alpha = 0; \quad (1)$$

$$p_{уд} = \rho c V_0; \quad p_{уд} \Delta W = \text{const};$$

$$\Delta W = \frac{p_{уд}}{2 \cdot 10^4 p_{ат}} W_p,$$

де  $T_1, T_2$  – погонні сили;  $\delta$  – товщина оболонки;  $R$  – радіус оболонки;  $u, \omega$  – переміщення;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – деформації вздовж головних осей;  $\alpha$  – кут між віссю обертання резервуара і нормаллю до деформованої поверхні в точці  $A_1$ ;  $\Delta W$  – зміна об'єму рідини в резервуарі при гідроударі;  $W_p$  – об'єм рідини в ньому.

Для інтегрування наведеної системи рівнянь необхідно на кожному граничному контурі мати по дві граничні умови. Циліндрична оболонка довжиною  $L$  має наступні граничні умови:

$$\omega(0) = 0; \quad u(0) = 0; \quad \alpha(L/2) = \pi/2; \quad T_1(L/2) = p_{уд}(R + \omega)/2.$$

На рис. 4 показана залежність зміни тиску в резервуарі після падіння від величини додаткового об'єму резервуара (ємність резервуара з рідиною  $0,03 \text{ м}^3$ , час удару резервуара по поверхні землі  $t = 0,001 \text{ с}$ ).

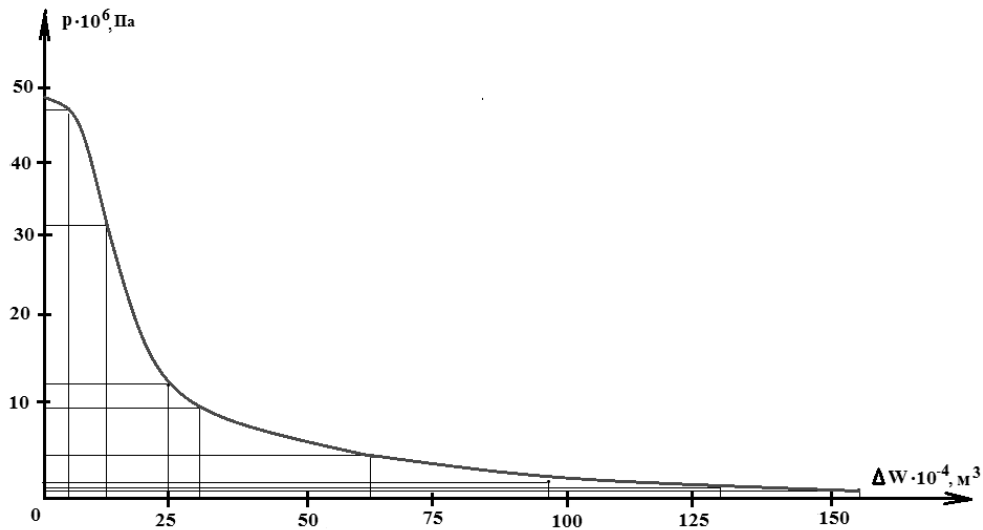


Рис. 4

На рис. 5 показана залежність зміни напружень, що виникають в стінках резервуара після падіння від величини тиску рідини в резервуарі після падіння (ударний тиск рідини в резервуарі при падінні  $p_{уд} = 4,9 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ).

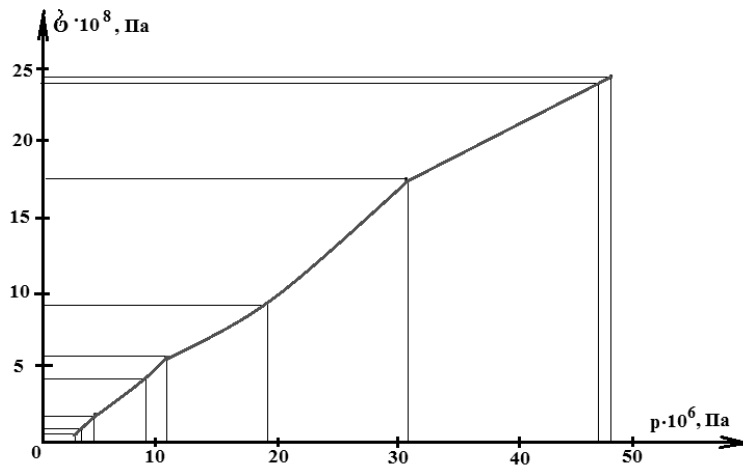


Рис. 5

## §2. Аналіз отриманих результатів.

Для зменшення величини напружень, що виникають у стінках резервуара з рідиною при його безпарашутному скиданні, пропонується з'єднати зовнішню та внутрішню оболонки резервуара пересувною заслінкою за допомогою сили сухого тертя. Це дасть змогу зручно експлуатувати резервуар (наповнювати його рідиною, транспортувати його, зберігати рідину в резервуарі, завантажувати резервуар з рідиною в літальний апарат, здійснювати його скидання з літального апарату). Крім того, з'єднання зовнішньої та внутрішньої оболонок резервуара пересувною заслінкою за допомогою сили сухого тертя дасть змогу за час удару збільшити його ємність, знизивши тиск на його стінки під час удару.

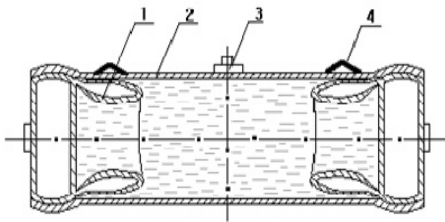


Рис. 6



Рис. 7

За результатами досліджень була розроблена конструкція резервуара, складові елементи якого не руйнуються при ударі, що представлена на рис. 6. Резервуар містить вкладені одна в іншу еластичні оболонки – внутрішню 1 і зовнішню 2. Внутрішня оболонка призначена для заповнення рідиною, при цьому вона має більшу довжину, ніж зовнішня. Торці зовнішньої оболонки розгерметизовано. На зовнішній оболонці розміщено наливне пристосування 3 і ручки 4 [15]. Зв'язок між оболонками забезпечується силою тертя.

При ударному впливі на резервуар відбувається наростання тиску рідини, що впливає на внутрішню оболонку 1, розтягуючи її до допустимих величин напружень еластичного матеріалу. При цьому внутрішня оболонка разом з потоком рідини, що рухається, переборюючи силу тертя між оболонками, розвертається до максимальних розмірів. У процесі перетікання рідини відбувається подальша втрата енергії за рахунок заповнення обсягів внутрішньої оболонки, що розгорнулася.

На рис. 7 представлено експериментальний зразок резервуара до і після падіння.

Експериментальні дослідження зі скидання резервуара з рідиною масою 30 кг із висоти 300 м підтвердили працездатність запропонованого типу конструкцій. Було проведено 6 скидань резервуара з рідиною з гвинтокрила Мі-2. В усіх випадках резервуар не руйнувався і була забезпечена збереженість рідини.

#### **Висновок.**

1. В результаті проведення досліджень удосконалено математичну модель визначення напружень в еластичних резервуарах при їх безпарашутному скиданні з літальних апаратів для оптимального проектування форми і конструкції резервуарів.

Результати дослідження дозволяють зробити висновок про принципову можливість збереженості резервуарів з рідиною при їх безпарашутному скиданні з літальних апаратів.

2. Запропоновано математичну модель визначення НДС еластичного резервуара, навантаженого внутрішнім надлишковим змінним тиском для визначення величини напружень, що виникають у стінці внутрішньої оболонки конструкції резервуара при безпарашутному скиданні. Зменшення величини напружень в стінках резервуара при ударі по поверхні здійснюється шляхом з'єднання зовнішньої та внутрішньої оболонок резервуара пересувною заслінкою за допомогою сили сухого тертя. Це дозволить знизити тиск в резервуарі за допомогою збільшення його ємності.

3. Запропоновано конструкцію еластичних резервуарів з рідиною для їх безпарашутного скидання з літальних апаратів.

Експериментальні дослідження зі скидання резервуара з рідиною масою 30 кг із висоти 300 м підтвердили працездатність запропонованого типу конструкцій резервуара. В усіх випадках резервуар не руйнувався і була забезпечена збереженість рідини.

**РЕЗЮМЕ.** Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень щодо визначення напружень у пружних м'яких баках під час їх безпарашутного скидання з літака для оптимального проектування форми та конструкції баків. Задача полягає у визначенні напружено-деформованого стану м'яких резервуарів (оболонок) при комплексному навантаженні (зовнішньому – удар по поверхні землі та внутрішньому – прямий гідравлічний удар рідини в резервуарі при його ударі по поверхні землі). Запропоновано конструкцію еластичних баків з рідиною для їх безпарашутного скидання з літальних апаратів та модель розрахунку їх напружено-деформованого стану.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** еластичний резервуар з рідиною, гідравлічний удар, міцність конструкції, напружено-деформований стан, безпарашутне скидання.

1. *Акимов Д.В., Грищак В.З., Гребенюк С.Н., Гоменюк С.И.* Сравнительный анализ методик расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкции ракетносителя // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2016. – № 2. – С. 116 – 120.
2. *Бахтизин Р.Н, Масалимов Р.Б., Зарипов Р.М., Зарипова К.Р.* Напряженно-деформированное состояние и оценка прочности трубопровода, составленного из кривых вставок, с учетом воздействия на трубу внутреннего рабочего давления и температурных напряжений // *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал.* – 2013. – № 5. – С. 207 – 243.
3. *Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И.* Строительная механика ракет. – Москва: Высшая школа, 1984. – 391 с.
4. *Беспалько С.В., Богачев В.И.* Исследования о распространении изменения давления жидкого груза в котле железнодорожной цистерны при гидроударе // *Транспорт.* – 2013. – № 3. – С. 61 – 63.
5. *Богданов В.В., Карпов И.И.* Факторы, влияющие на тыловое обеспечение малочисленных подразделений (из опыта локальных войн) // *Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения.* – 2018. – 48, № 4. – С. 15 – 19.
6. *Богомаз Г.И., Науменко Н.Е., Хижа И.Ю.* Конечно-элементный подход к исследованию динамики конструкций, содержащих емкости с жидкостью // *Питання прикладної математики і математичного моделювання. Збірник наукових праць.* – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2002. – С. 14 – 21.
7. *Гарт Е.Л., Гудрамович В.С., Марченко О.А.* Вплив кільцевого включення на напружено-деформований стан сферичної оболонки з круговим отвором при дії рівномірного внутрішнього тиску // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій.* – 2019. – № 29. – С. 53 – 61.
8. *Герасимчук О.П., Селезньов Е.Л., Шимчук С.П.* Гідравліка, гідро- та пневмоприводи. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – 168 с.



9. Гонтаровский П.П., Сметанкина Н.В., Гармаш Н.Г., Глядя А.А., Клименко Д.В., Сиренко В.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния топливного бака вафельной конструкции ракеты-носителя // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2019. – 29. – С. 91 – 102.
10. Гудрамович В.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций ракетной техники и энергетики // Техническая механика. – 2013. – № 4. – С. 97 – 104.
11. Дмитриенко Р.И. Использование метода остаточного расширения баллонов. Из опыта проведения гидравлических испытаний сосудов внутренним давлением // Рабочая записка. ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев: RZ DRI – 120214. URL, 2017. – 27с.
12. Киселев В.Д., Болотов А.В., Сатонин А.П., Кашаева Е.А., Коновалов А.И. Сжимаемость жидкости и ее внутреннее давление // Ученые записки Казанского государственного университета. – 2008. – 150, № 3. – С. 76 – 90.
13. Павлюченков М.В. Раціоналізація конструкції опорних пристроїв вагонів-цистерн для рідких вантажів // Наука и прогресс транспорта: Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2014. – № 1(49). – С. 151 – 159.
14. Патент на изобретение № 1506799 СССР, МКИ В 65 D 88/16 Резервуар / В.В. Барышников, Л.К. Бессонов, В.Ф. Греков, А.В. Ковтун, А.П. Кусков, В.А. Прокопов (СССР). – N4265294/40; Заявлено 19.06.87; Опубл. 08.05.89, Бюл. № 14 – 4 с.
15. Патент № 143893 України на корисну модель, МПК В 65 D 88/16 (2006.01) Резервуар для беспарашютного скидання вантажів / А.В. Ковтун, С.І. Нестеренко; власник Нестеренко С.І. -N а 2019 06831; Заявлено 18.06.19; Опубл.25.08.20 Бюл. № 16. – 5 с.
16. Петраков Б.И. Расчет эластичных цилиндрических емкостей при ударе о плоскость // Прикл. механика. – 1968. – Т.4. № 3. – С. 134 – 168.
17. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Дельта, 2008. – 816 с.
18. Пулято А.В. Расчет на прочность котла вагона-цистерны с учётом решения задачи гидроупругости // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2009. – № 108. – С. 115 – 120.
19. Самарцев А.В. Беспарашютное десантирование // Военный научно-практический вестник. – 2017. – № 2(7). – С. 33 – 38.
20. Семененко В., Крижановська Т., Семененко Т. Моделювання динаміки і розрахунків міцності тіл, що проникають у воду з великою швидкістю // Сучасні проблеми механіки та математики. Збірник наукових праць у 3-х томах. Т.2. – 2018. – С. 196 – 198.
21. Спиридонов А.Н., Плоткин В.С. К обоснованию выбора закона распределения давления по длине обечайки котла вагонов-цистерн от гидравлического удара при их соударении // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 1. – С. 19 – 20.
22. Яскеляин А.В. Исследование гидравлического удара в жидкости при колебаниях трубопровода // Проблемы прочности и пластичности. – 2008. – вып.70. – С. 62 – 70.
23. Ясній П.В., Пиндус Ю.І., Гудь М.І. Методологія експериментального дослідження впливу спектру навантаження на поведінку і втомне пошкодження під час транспортування ракети носія // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування Праці конференції 19 – 22 вересня 2017 р., Тернопіль. – С.167 – 168.
24. Konstantinov A.V., Limarchenko O.S., Lukyanchuk V.V., Nefedov A.A. Dynamic Methods of Damping the Oscillation in Structure-Free-Surface Fluid System // Int. Appl. Mech. – 2019. – Т.55, №1. – Р. 58 – 67.

Надійшла 11.10.2021

Затверджена до друку 13.12.2022