

УДК 539.3

## МІЦНІСТЬ КОМПОЗИТНОГО ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ СТАРТА РАКЕТИ

<sup>1</sup> **К. В. Аврамов**, д-р техн. наук  
[kvavramov@gmail.com](mailto:kvavramov@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8740-693X

<sup>2</sup> **В. М. Сіренко**, канд. техн. наук  
[v.n.sirenko@i.ua](mailto:v.n.sirenko@i.ua), ORCID: 0000-0002-8152-2358

<sup>2</sup> **В. В. Заверуха**

<sup>3</sup> **С. І. Планковський**, д-р техн. наук  
[sergiy.plankovskyy@kname.edu.ua](mailto:sergiy.plankovskyy@kname.edu.ua), ORCID: 0000-0003-2908-903X

<sup>3</sup> **Є. В. Цегельник**, канд. техн. наук  
[y.tsegelnyk@kname.edu.ua](mailto:y.tsegelnyk@kname.edu.ua), ORCID: 0000-0003-1261-9890

<sup>3</sup> **В. В. Комбаров**, канд. техн. наук  
ORCID: 0000-0002-6158-0374

<sup>1</sup> Інститут проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного НАН України,  
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

<sup>2</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро  
«Південне» ім. М. К. Янгеля»,  
49008, Україна, м. Дніпро, вул. Криворізька, 3

<sup>3</sup> Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
61002, Україна, м. Харків, Маршала Бажанова, 17

*Розглядається транспортно-пусковий контейнер для старту ракет із склопластику. Основною метою статті є розрахунок напруженого стану цього контейнера й перевірка умов міцності. Розрахунок тисків продуктів згоряння проводиться для декількох положень сопла ракети в контейнері. Розглядаються два випадки: коли сопло знаходиться посередині контейнера і на виході з контейнера. Максимальні значення тиску, що діє на внутрішній бік контейнера, спостерігаються при виході сопла ракети з контейнера. Поле тисків є осесиметричним. З огляду на це для апроксимації поля тиску воно розкладається в ряд Фур'є за позовжньою координатою ракети. Напружений стан контейнера також є осесиметричним. Крім того, він також розглядається для двох випадків взаємного розташування сопла і контейнера. Для розрахунку напруженого стану використовувався метод скінченних елементів, який реалізовано в програмному комплексі ANSYS. Найбільші значення напружень спостерігаються під час виходу сопла з контейнера. Як впливає із скінченно-елементних розрахунків, найбільшими напруженнями є окружні. Для аналізу міцності контейнера використовується межа міцності склопластику. Як видно з розрахунків, контейнер задовольняє умовам міцності з великим коефіцієнтом запасу.*

**Ключові слова:** аеродинамічна навантаження, напружений стан, старт ракети, композитний матеріал.

### Вступ

Транспортно-пусковий контейнер використовується для запуску ракет, що може здійснюватися з машини. Крім того, запуск ракети можливий так само з дозвукового літака-носія. Основним призначенням транспортно-пускового контейнера для старту ракети з машини є зберігання, транспортування ракети та її запуск, а під час пуску ракети з літака-носія – виключення механічних ударних впливів на ракету, температурних і електромеханічних впливів, запуск і транспортування ракети. Транспортно-пусковий контейнер, крім вказаного, також використовується для запуску ракети поліцейськими у гуманітарних цілях [1].

Транспортно-пусковий контейнер являє собою композитну направляючу трубу. Під час його проектування мають проводитися такі розрахунки [2, 3]:

- 1) ударно-хвильових і газодинамічних навантажень, що діють на транспортно-пусковий контейнер числовими методами газодинаміки;
- 2) міцності композитного корпусу транспортно-пускового контейнера, який має забезпечувати старт ракети і захист ракети від поперечних перевантажень.

Для виготовлення контейнера використано склопластик. Багато зусиль докладено до дослідження механічних характеристик склопластику. Вони детально розглянуті в роботах [4–7].

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.  
© К. В. Аврамов, В. М. Сіренко, В. В. Заверуха, С. І. Планковський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, 2023

У цій статті викладається методика розрахунку міцності композитних транспортно-пускових контейнерів ракет на основі програмного комплексу ANSYS. Навантаження, що діють на контейнер, визначаються з газодинамічного розрахунку, який так само представлений у цій статті. Зроблено висновки про міцність склопластикового контейнера.

### Розрахунок аеродинамічних навантажень

Розглядаються результати чисельного моделювання витоку надзвукового струменя в напівзамкнений простір пускової труби (циліндричної труби). За результатами цього розрахунку вивчаються параметри течії газу вздовж труби залежно від відносних розмірів сопла й труби, термодинамічних і газодинамічних характеристик надзвукового струменя. Газодинамічна течія є осесиметричною і не залежить від окружної координати.

Параметри газодинамічних розрахунків обиралися наступними: число Маха  $M_a=2,5-3$ ; нерозрахунковість  $n=p_a/p_\infty=3,5$ ; відносне подовження труби  $L/D=25$ ; зазор між трубою і ракетною  $D/D_1=1,004$ , де  $L$ ,  $D$  – довжина та діаметр труби;  $D_1$  – діаметр ракети;  $p_\infty$  – тиск атмосфери.

На рис. 1 представлені значення розподілу абсолютного статичного тиску на внутрішній стінці труби на момент виходу ракети з труби залежно від відносного подовження труби.

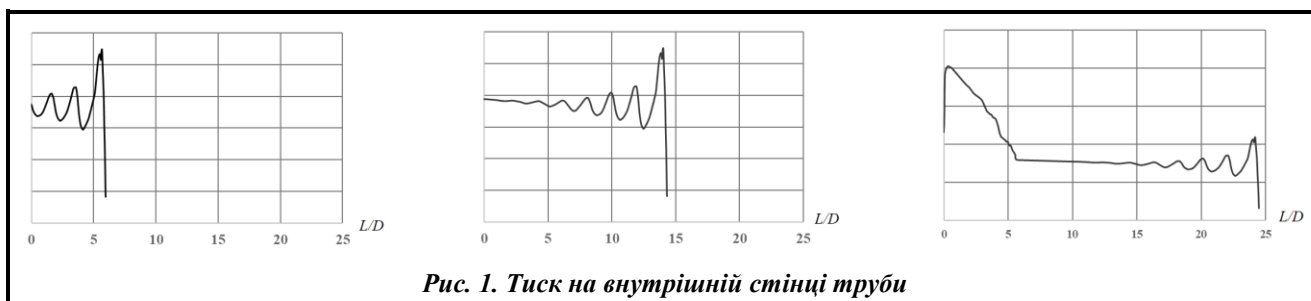


Рис. 1. Тиск на внутрішній стінці труби

За результатами видно, що формується хвилеподібна структура. Вона характерна для струменя, який витікає в напівзамкнений простір труби. Внизу по потоку параметри на стінках труби мають особливості залежно від подовження труби. Видно, що перша зона з максимальним значенням формується на відстані  $(1-1,2) \times D_a$ , де  $D_a$  – діаметр сопла; друга зона – на нижній частині труби.

Виходячи з отриманих результатів можна запропонувати наступну формулу розрахунку тиску на внутрішній стінці труби в зоні сопла:  $P = 1,5 \cdot n \cdot p_\infty$ .

Максимальні значення тиску на внутрішній стінці труби на момент виходу ракети з контейнера розраховуються так:  $P_{\max} = 3 \cdot n \cdot p_\infty$ .

Побудуємо апроксимацію розподілу тисків, що діють на внутрішню стінку контейнера. Для цього виведемо досить точну функцію, що апроксимує розподіл тиску (рис. 1). Для випадку повного виходу сопла з труби ця функція складається з п'яти кусочно-лінійних ділянок. Ця функція представлена жирними лініями на рис. 2. Апроксимацію тиску залежно від поздовжньої координати контейнера  $x$  можна уявити так:

$$P(x) = \begin{cases} a_0x + b_0; & x_0 < x < x_1 \\ a_i x + b_i; & x_i < x < x_{i+1}; i = 1, \dots, 4 \end{cases} \quad (1)$$

Деякі параметри розкладання (1) такі:  $x_0=b_0=a_2=0$ ;  $x_5=L$ . Інші параметри набувають наступних значень:

$$\begin{aligned} x_1=0,06; & x_2=1,1; & x_3=4,5; & x_4=4,8; & L=5 \text{ м;} \\ a_0=16,67; & a_1=-0,577; & a_3=0,5; & a_4=-2,75 \text{ МПа/м;} & \\ b_1=1,0347; & b_2=0,4; & b_3=-1,85; & b_4=13,75 \text{ м.} & \end{aligned} \quad (2)$$

Жирною лінією на рис. 3 позначається апроксимація розподілу тиску, що діє на контейнер, якщо сопло ракети розташоване посередині. Ця апроксимація складається з п'яти кусочно-лінійних ділянок, яка добре описується (1). Параметри співвідношення (1) такі:

$$x_0=0; \quad x_1=0,01; \quad x_2=0,7; \quad x_3=2,24; \quad x_4=2,62; \quad x_5=2,7 \text{ м;}$$

$$a_0=30,0; a_1=-0,2898; a_2=-0,026; a_3=0,368; a_4=-2,5 \text{ МПа/м}; \quad (3)$$

$$b_0=0; b_1=0,303; b_2=0,1182; b_3=-0,76; b_4=6,75 \text{ м}.$$

Для проведення розрахунків на міцність будемо використовувати пакет ANSYS. У цьому пакеті апроксимацію тиску (1) надзвичайно важко реалізувати. Значно простіше застосовувати розкладання тиску (1) у ряд Фур'є:

$$P(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1} \left[ a_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right) \right]. \quad (4)$$

Розкладання (4) позначені тонкою суцільною лінією на рис. 2, 3. У цих розкладаннях присутні 20 гармонік ряду Фур'є. Ці лінії надзвичайно близькі до жирних ліній, якими показуються апроксимації (1).

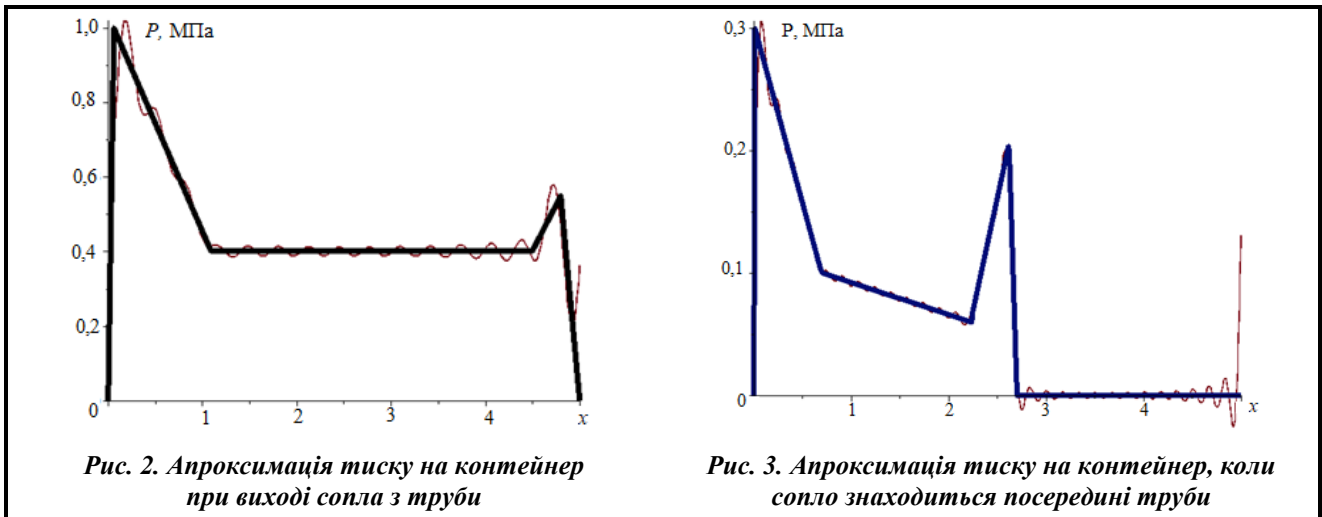


Рис. 2. Апроксимація тиску на контейнер при виході сопла з труби

Рис. 3. Апроксимація тиску на контейнер, коли сопло знаходиться посередині труби

### Напружений стан контейнера

Напружений стан контейнера розглядатимемо в циліндричній системі координат. У поздовжньому напрямку циліндричної труби розташуємо координату  $x$ ; в окружному напрямку – координату  $\varphi$ , а в радіальному – координату  $z$ .

Механічні характеристики склопластику обирали такими [4–7]: модулі Юнга  $E_\varphi=2,69 \times 10^9$  Па;  $E_x=2,2 \times 10^9$  Па; модулі зсуву  $G_{x\varphi}=4,07 \times 10^9$  Па;  $G_{\varphi z}=G_{xz}=5,0 \times 10^9$  Па; коефіцієнти Пуассона  $\nu_{x\varphi}=0,11$ ;  $\nu_{\varphi z}=\nu_{xz}=0,3$ .

Склопластиковий контейнер у вигляді циліндра має такі геометричні розміри: довжина  $L=5$  м; діаметр  $D=20$  см; товщина  $h=6$  мм.

Тиск, що діє на контейнер зсередини, є осесиметричним, з огляду на це напружений стан буде осесиметричним. Розрахунок напруженого стану склопластикового контейнера проводиться під дією газодинамічного тиску, представленого на рис. 2, 3, у програмному комплексі ANSYS. Використовувався його розрахунковий модуль Static Structural. Спосіб виклику основних підпрограм цього блоку наведено на рис. 4. Препроцесор програми Geometry наводиться на рис. 5.

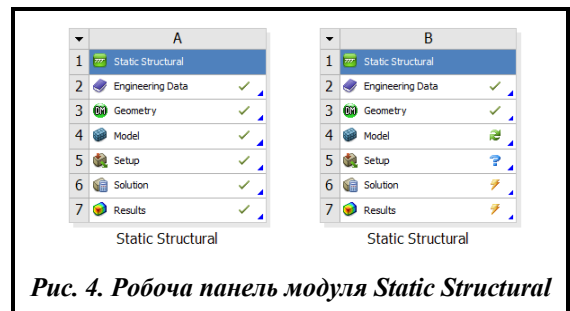


Рис. 4. Робоча панель модуля Static Structural

Оболонка препроцесора Model зображена на рис. 6. Також на цьому рисунку показано скінченно-елементну сітку конструкції.

Результати розрахунку еквівалентних напружень у корпусі контейнера наводяться на рис. 7, 8. Так, на рис. 7 зображено еквівалентні напруження в корпусі композитного контейнера, які виникають під дією аеродинамічного тиску (рис. 2), а на рис. 8 – еквівалентні напруження в склопластиковому контейнері, що виникають унаслідок дії аеродинамічного тиску (рис. 3).

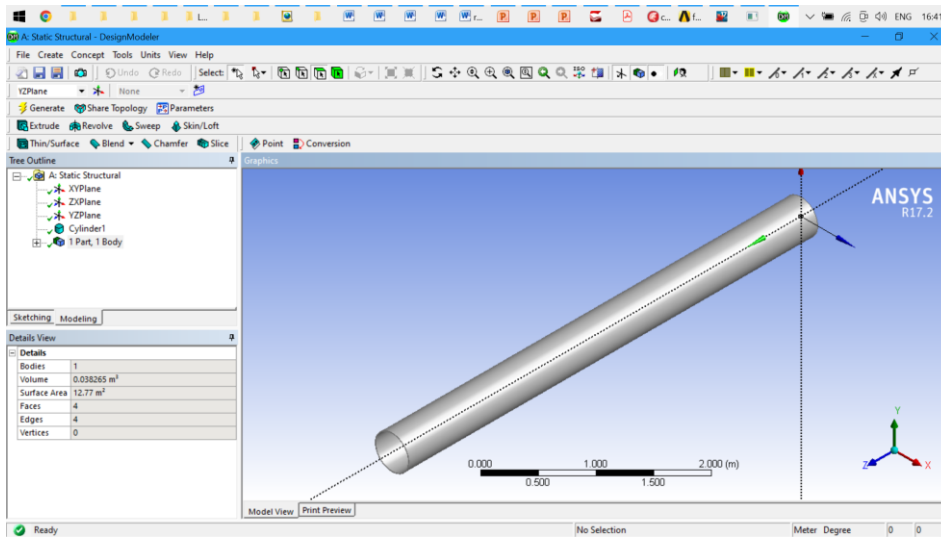


Рис. 5. Препроцесор підпрограми Geometry

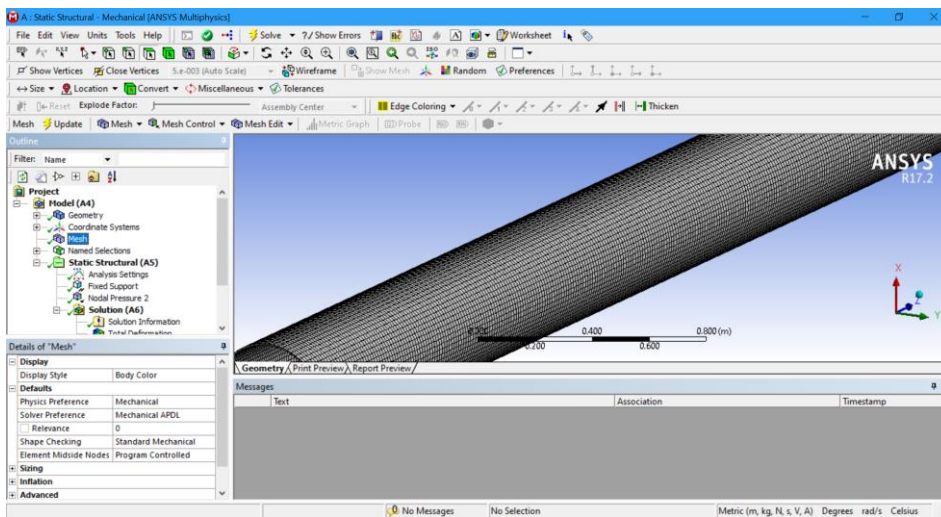


Рис. 6. Препроцесор підпрограми Model

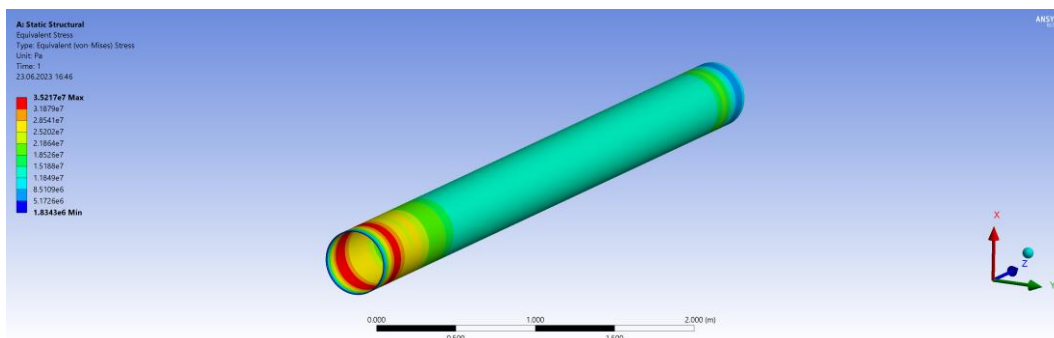


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень у контейнері під дією аеродинамічного тиску, представлено на рис. 2

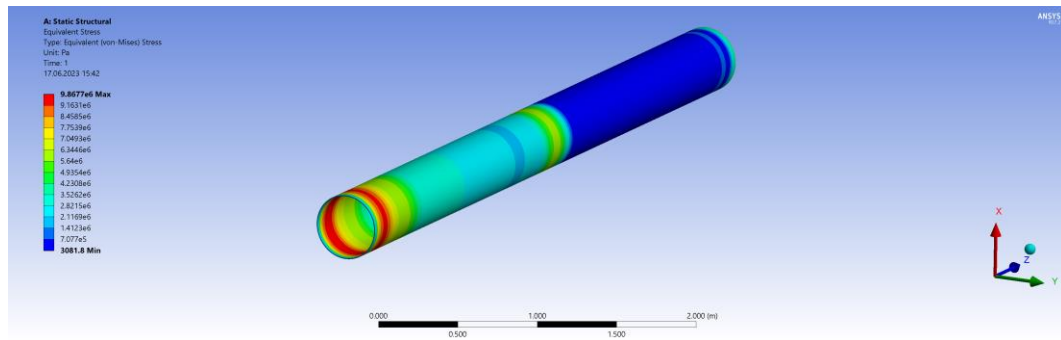


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень у контейнері під дією аеродинамічного тиску, представленого на рис. 3

Тепер проведемо оцінку статичної міцності контейнера. Згідно з [6] межа міцності склопластику дорівнює  $\sigma_* = 1 \times 10^8$  Па. Максимальні еквівалентні напруження, що виникають у конструкції (рис. 4, 5), дорівнюють  $\sigma_e = 9,8 \times 10^6$  Па;  $\sigma_e = 3,5 \times 10^7$  Па.

### Висновки

Розглянуто варіант транспортно-пускового контейнера з композитного матеріалу (склопластику). Запропоновано методику розрахунку напруженого стану такого контейнера, яка складається з двох етапів. На першому етапі моделюють аеродинаміку продуктів згоряння, що виходять із сопла ракети і рухаються трубою. У результаті цього моделювання визначається поле тисків, що діє на внутрішню стінку контейнера. На другому етапі проводиться комп'ютерне моделювання напруженого стану контейнера під дією обчисленого поля тисків.

Для розрахунку напруженого стану контейнера запропоновано застосовувати програмний комплекс ANSYS. За результатами розрахунків напруженого стану зроблено висновок, що контейнер із запропонованими геометричними параметрами із склопластику задовольняє критеріям міцності з великим коефіцієнтом запасу.

### Література

1. Yang J., Wang Z. Numerical simulation of launch tube based on container-type missile launch technology. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 31. P. 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1028>.
2. Самарцева С. И., Болтянский И. М., Кольга В. В. Расчет транспортно-пускового контейнера системы воздушного старта ракеты-носителя. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2020. Т. 1. С. 102–104.
3. Пешков Р. А., Сидельников Р. В. Анализ ударно-волновых нагрузок на ракету, пусковую установку и контейнер в процессе старта. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2015. Т. 15. № 2. С. 81–91.
4. Вавилова М. И., Кавун Н. С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 3. С. 33–37. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37>.
5. Давыдов И. Ф., Кавун Н. С. Стеклопластики – многофункциональные композитные материалы. *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 253–260.
6. Dogan A., Atas C. Variation of the mechanical properties of E-glass/epoxy composites subjected to hygrothermal aging. *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 50. Iss. 5. P. 637–646. <https://doi.org/10.1177/0021998315580451>.
7. Martynenko V. G., Lvov G. I., Ulianov Yu. N. Experimental investigation of anisotropic viscoelastic properties of glass fiber-reinforced polymeric composite material. *Polymers and Polymer Composites*. 2019. Vol. 27. Iss. 6. P. 323–336. <https://doi.org/10.1177/0967391119846362>.

Надійшла до редакції 08.11.2023