

Т.А. Манько, О.В. Літот, В.В. Мурашко

## ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЦІЛЬНОКОМПОЗИТНОГО БЕЗЛЕЙНЕРНОГО ТРУБОПРОВОДУ ІЗ ВУГЛЕПЛАСТИКУ ДЛЯ КРІОГЕННИХ КОМПОНЕНТІВ ПАЛИВА

*Анотація.* У статті представлено результати теоретичних досліджень конструкції суцільнокомпозитного безлейнерного трубопроводу із вуглепластику для криогенних компонентів палива. Побудовано геометричну та розрахункову моделі композиційної трубної конструкції з урахуванням її схеми армування. На основі чисельного моделювання напружено-деформованого стану в програмі Ansys визначено розподіл радіальних і осевих переміщень, а також напружень у напрямі волокон силової оболонки під дією внутрішнього тиску. Отримані результати свідчать про ортотропний характер деформування конструкції та суттєвий вплив орієнтації волокон на рівень напружень у матеріалі. Показано, що застосування шаруватих моделей дозволяє адекватно описати механічну поведінку вуглепластикової труби в умовах експлуатаційного навантаження. Результати дослідження можуть бути використані для уточнення інженерних методик розрахунку композиційних трубопроводів та обґрунтування конструктивних параметрів при проектуванні систем подавання криогенних компонентів палива.

*Ключові слова:* композиційні матеріали, композиційний трубопровід, вуглепластик, напружено-деформований стан; чисельне моделювання, армувальні волокна, внутрішній тиск, міцність конструкції.

**Постановка задачі.** Розвиток ракетно-космічної техніки (РКТ) зумовлює підвищення вимог до масогабаритних характеристик, надійності та довговічності елементів паливних систем, зокрема криогенних трубопроводів. Транспортування криогенних компонентів палива (зрідженого кисню, водню, метану) здійснюється в умовах наднизьких температур і внутрішнього надлишкового тиску, що створює складний комплекс термомеханічних навантажень. Традиційні металеві конструкції мають значну масу та обмеження щодо термостійкості й корозійної витривалості, що актуалізує пошук альтернативних матеріалів.

Перспективним напрямом є застосування суцільнокомпозитних безлейнерних трубопроводів на основі вуглепластиків, які поєднують високу питому міцність, жорсткість та корозійну стійкість. Водночас експлуатація таких конструкцій у криогенних умовах супроводжується специфічними явищами: ортотропією механічних властивостей, різницею коефіцієнтів термічного розширення складових, можливістю локаль-

ної концентрації напружень у зонах переходу до фланців та в місцях з'єднання з металевими елементами. Це зумовлює необхідність комплексного теоретичного дослідження їх напружено-деформованого стану з урахуванням температурного та механічного навантаження.

Отже, актуальною науково-технічною задачею є обґрунтування міцності та жорсткості суцільнокомпозитного безлейнерного трубопроводу для криогенних компонентів палива на основі чисельного моделювання його роботи в умовах експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових працях В. Арсеньєва та В. Козіна, присвячених теоретичним основам криогенної техніки та розрахунку циклів криогенних установок, обґрунтовано закономірності теплофізичних і термодинамічних процесів за наднизьких температур. Автори показують, що робота елементів криогенних систем супроводжується істотними змінами фізичних властивостей матеріалів, що зумовлює необхідність урахування температурних факторів при розрахунку трубопроводів і ємнісних конструкцій, призначених для транспортування зріджених газів [1].

Експериментальні дослідження композиційних матеріалів у криогенному середовищі (Т. Манько, О. Літот та В. Мурашко) засвідчують, що зниження температури до рівня зріджених газів супроводжується зростанням модуля пружності та зменшенням пластичних деформацій, що змінює характер напружено деформованого стану оболонкових конструкцій. Аналіз механічних і мікроструктурних характеристик композиційних трубопроводів після впливу внутрішнього тиску та циклічних температурних навантажень свідчить про формування локальних змін у міжшарових зонах, які можуть бути джерелом концентрації напружень і накопичення пошкоджень [5, 6, 8].

Задача проєктування композиційних ємностей і трубопроводів елементів для аерокосмічної техніки також розглядається у працях О. Шевцова та В. Шевцова, присвячених аналізу конструктивних рішень та шляхів підвищення їх надійності за умов складного навантаження [9]. У міжнародних дослідженнях значну увагу приділено аналітичному та чисельному моделюванню напружено деформованого стану багатошарових композиційних труб із різними кутами намотування волокон, що дозволяє встановити вплив схеми армування на розподіл осьових і кільцевих напружень при комбінованій дії внутрішнього тиску та температурних факторів [10].

Експериментальні дослідження властивостей труб, виготовлених методом намотування, показують, що механічна поведінка таких конструкцій істотно залежить від параметрів технологічного процесу та структурної організації шарів, що необхідно враховувати при побудові розрахункових моделей [11]. Узагальнюючі огляди сучасних методів моделювання композиційних конструкцій свідчать про доцільність застосування багатошарових ортотропних моделей для прогнозування їх напружено деформованого стану за складних умов навантаження [12].

Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, питання комплексної оцінки напружено деформованого стану суцільнокомпозитних безлейнерних трубопроводів у реальних умовах експлуатації з урахуванням одночасного впливу механічних і температурних факторів залишається недостатньо висвітленим. Особливої уваги потре-

бує узгодження експериментальних даних із результатами чисельного моделювання та обґрунтування параметрів конструкції з позицій забезпечення заданого рівня міцності й надійності.

**Метою дослідження** є теоретичне обґрунтування міцності та жорсткості суцільнокомпозитного безлейнерного трубопроводу із вуглепластику для транспортування кріогенних компонентів палива шляхом моделювання його напружено-деформованого стану за умов дії внутрішнього надлишкового тиску та кріогенної температури.

**Викладення основного матеріалу.** Сучасні вимоги до виробів РКТ, таких як кріогенні трубопроводи, що працюють у складних умовах експлуатації і кріогенних середовищах, пов'язані з оцінкою напружено-деформованого стану конструкції [5].

Задача забезпечення надійності та довговічності композиційних трубних конструкцій залишається актуальною для сучасного машинобудування, авіаційної та енергетичної галузей [7]. Композити на основі вуглецевих волокон активно використовуються у виробництві високонавантажених елементів, однак їх поведінка за умов комплексного впливу внутрішнього тиску, змін температури та попередньої деформації досі вивчена недостатньо [4]. Моделювання напружено-деформованого стану конструкції дозволяє дослідити характер навантаження конструкції, визначити слабкі зони та місця концентрації напружень, а можливість експериментального підтвердження на дослідних зразках дає змогу оцінити правильність прийнятих допущень та долю реалізації матеріалу та технології в реальній конструкції [3, 8].

Для теоретичних досліджень напружено-деформованого стану силової оболонки досліджували трубопровід діаметром 183 мм з композиційними фланцями. На рисунку 1 подано його загальний вигляд, що дозволяє наочно відобразити геометричні параметри конструкції та її основні конструктивні елементи. Наведена схема ілюструє зону з'єднання композиційної оболонки з фланцевими елементами, яка є потенційно критичною з точки зору напружено-деформованого стану та потребує окремого аналізу в процесі моделювання.



Рисунок 1 - Загальний вигляд трубопроводу з композиційними фланцями

При моделюванні механічних навантажень, які діють на силову оболонку трубопроводу, розглядали навантаження максимальним експлуатаційним внутрішнім надлишковим тиском 1,95 МПа (коефіцієнт безпеки 2). При цьому, враховували, як технологічні обмеження, так і параметри устаткування для випробувань. Аналіз напружено-деформованого стану проводили для двох розрахункових випадків. Кути нахилу для шарів визначалися у відповідності до технологічності процесу виготовлення. Побудову геометричної моделі та внесення фізико-механічних властивостей виконували з урахуванням особливостей формування подвійного спірального шару, обумовленого технологією намотування [5]. Дослідження виконували за умов експлуатації при нормальній температурі (розрахунковий випадок 1) та в криогенному середовищі (температура  $T=-196^{\circ}\text{C}$ , розрахунковий випадок 2).

На рисунку 2 представлено схему армування силової оболонки трубчастої конструкції, яка відображає орієнтацію волокон у спіральних шарах центральної частини трубопроводу, сформованих у процесі намотування. Наведена схема дає змогу оцінити вплив напрямку армування на розподіл напружень у матеріалі та врахувати ортотропні властивості вуглепластику при чисельному моделюванні напружено-деформованого стану.

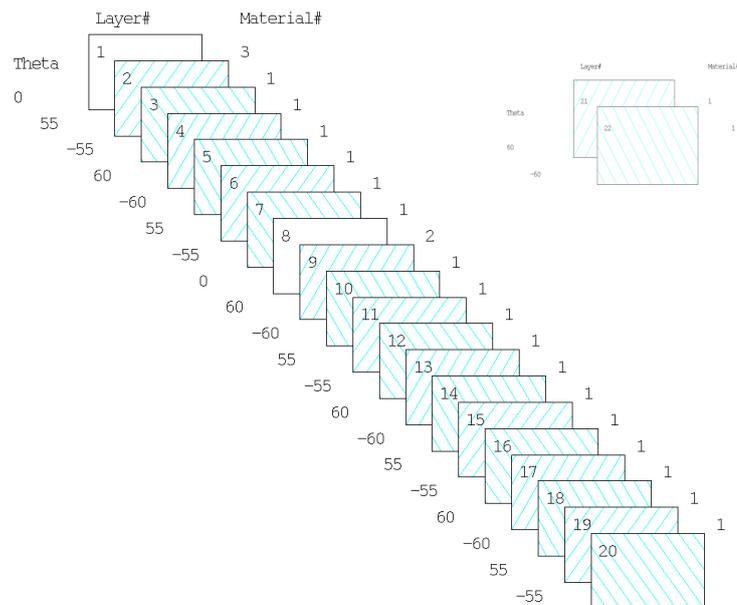


Рисунок 2 - Схема армування силової оболонки трубчастої конструкції

На рисунку 3 подано геометричну модель композиційної труби у тривимірній постановці, яка використовується як розрахункова схема для подальшого чисельного аналізу. Представлення конструкції у вигляді просторової моделі дозволяє врахувати реальні геометричні співвідношення між елементами оболонки та фланців, а також забезпечує коректне задання граничних умов і навантажень.

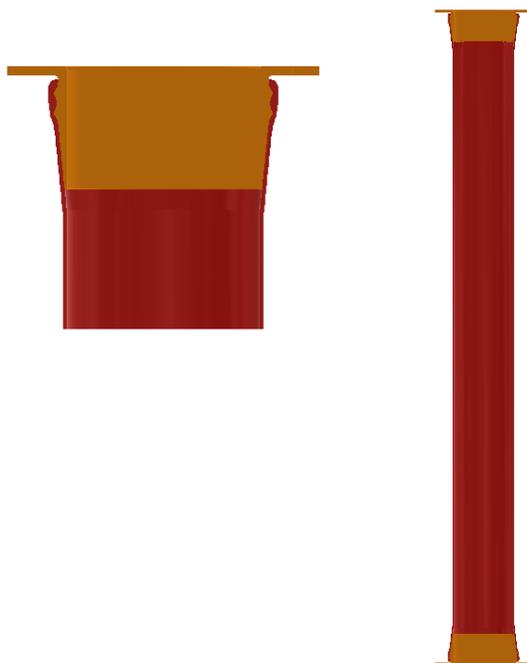


Рисунок 3 - Композиційна труба. Геометрична модель у 3D-постановці

На рисунках 4-5 наведено результати розрахунку радіальних та осьових переміщень композиційної труби під дією внутрішнього тиску. Графічне відображення полів переміщень дає змогу встановити характер деформації конструкції та визначити ділянки з максимальними значеннями переміщень, що має суттєве значення для оцінки експлуатаційної придатності трубопроводу.

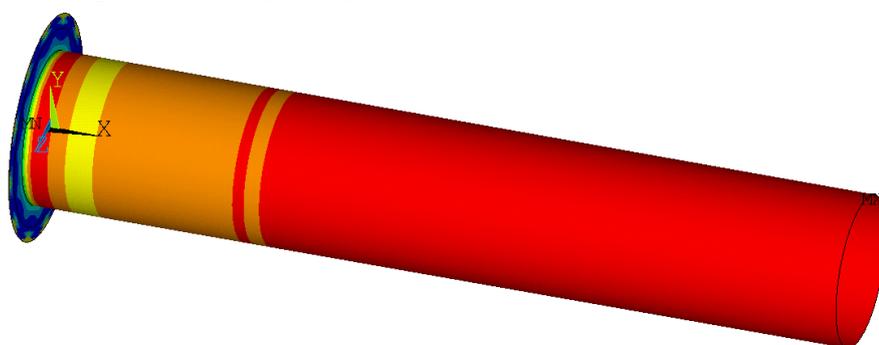


Рисунок 4 - Композиційна труба. Радіальні переміщення

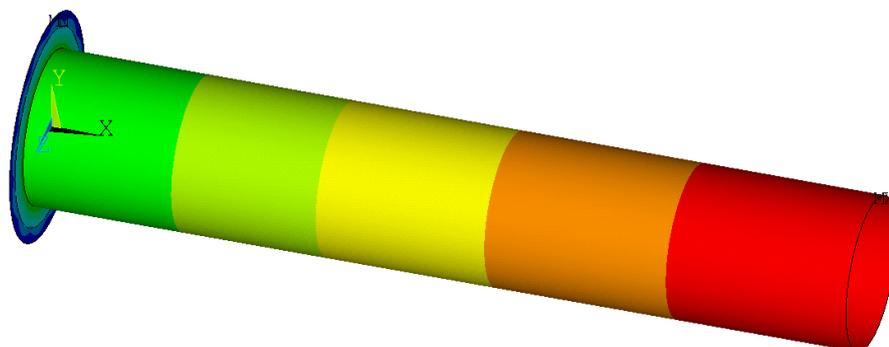


Рисунок 5 - Композиційна труба. Осьові переміщення

На рисунках 6-9 показано розподіл напружень у напрямі волокон у спіральних шарах силової оболонки. Отримані поля напружень відображають нерівномірність їх розподілу по довжині та товщині оболонки, що зумовлено геометрією конструкції та особливостями схеми армування. Це дозволяє ідентифікувати зони концентрації напружень, які є визначальними для оцінки міцності трубчастої конструкції.

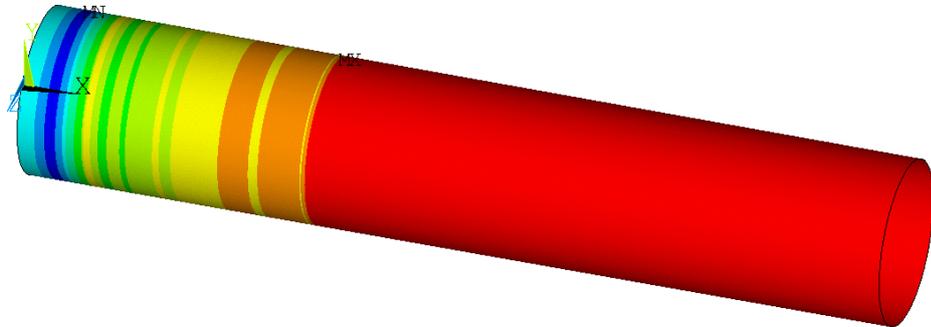


Рисунок 6 - Силова оболонка. Напряга вздовж волокон

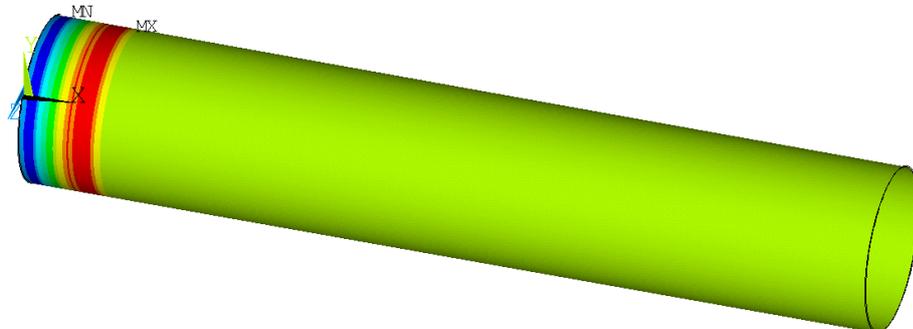


Рисунок 7 - Силова оболонка композиційної труби (спіральний шар 14).  
Напруги в напрямку волокна

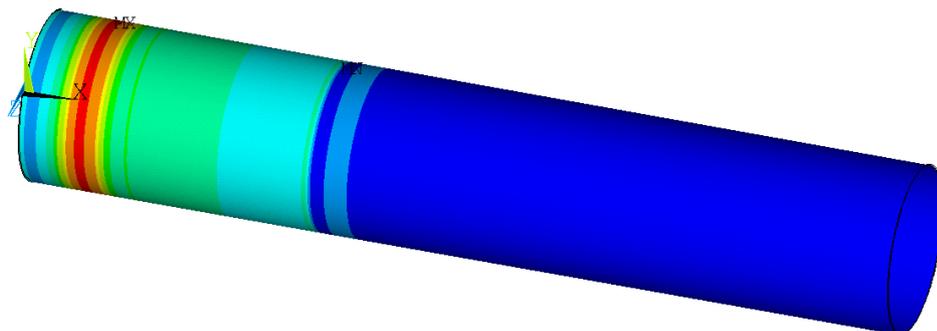


Рисунок 8 - Силова оболонка композиційної труби (спіральний шар 2).  
Напруги в напрямку волокна

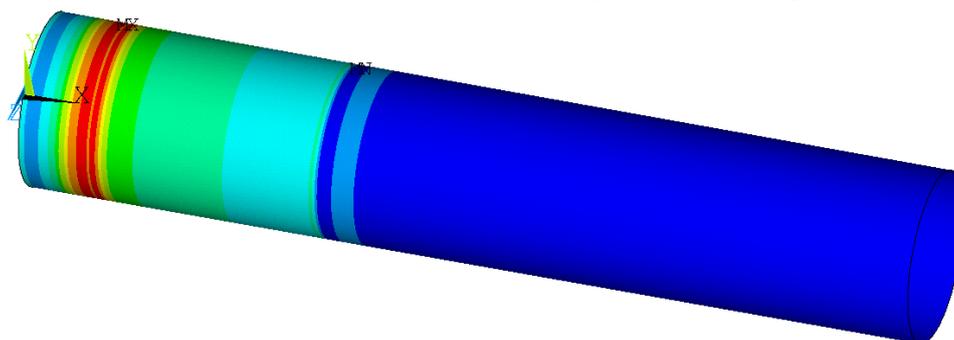


Рисунок 9 - Силова оболонка композиційної труби (спіральний шар 2).  
Відносні деформації у напрямку волокна

У таблиці 1 наведено узагальнені числові результати розрахунку напружено-деформованого стану композиційної трубчастої конструкції для двох розрахункових випадків, що відповідають нормальній температурі експлуатації та криогенним умовам.

Таблиця 1

Результати оцінки міцності трубчастої конструкції

Параметр	Розрахунковий випадок	
	1	2
<b>Переміщення експлуатаційні, мм</b>		
радіальні	0,0051	0,0034
осьові	0,188	0,13
<b>Відносні деформації експлуатаційні, %</b>		
осьові	0,0963	0,0642
кільцеві	0,0698	0,0465
<b>Гранична деформація на розрив, %</b>	0,8	
<b>Мінімальний запас міцності по деформаціях, <math>\eta_\epsilon</math></b>	3,54	5,31
<b>Напруги експлуатаційні, МПа</b>		
радіальні	0,027	0,018
осьові	64,5	43
кільцеві	128	85,3
максимальні головні	134	89,3
<b>Межа міцності на розрив у прошарку уздовж намотування, МПа</b>	2500	
<b>Мінімальний запас міцності по напругах уздовж намотування, <math>\eta_\sigma</math></b>	8,93	13,4

Дані таблиці свідчать, що при зниженні температури спостерігається зменшення переміщень і відносних деформацій, що обумовлено підвищенням жорсткості вуглепластикового матеріалу [6]. Мінімальний запас міцності за деформаціями становить  $\eta_\epsilon = 3,54$  для першого розрахункового випадку та  $\eta_\epsilon = 5,31$  для другого, що підтверджує достатню деформаційну працездатність конструкції. За напруженнями уздовж напрямку армування мінімальний запас міцності становить  $\eta_\sigma = 8,93$  при нормальній

температурі та  $\eta\sigma = 13,4$  у криогенних умовах, що свідчить про істотний вплив температурного чинника на рівень напруженого стану.

У таблиці 2 наведено розрахункові значення максимальних напружень у зоні композиційного фланця при стисненні та розтягу.

Таблиця 2

Параметр	Значення
<b>Напруги експлуатаційні, МПа</b>	
Розрахункові при стисненні	222,4
Розрахункові при розтягу	76,75

Отримані значення становлять відповідно 222,4 МПа для напружень стиснення та 76,75 МПа для напружень розтягу. Зіставлення цих величин із межею міцності матеріалу вздовж напрямку намотування, що дорівнює 2500 МПа, дозволяє визначити відповідні коефіцієнти запасу міцності. Для напружень стиснення запас міцності становить приблизно 11,2, тоді як для напружень розтягу він перевищує 32. Це свідчить про те, що зона композиційного фланця має значний резерв міцності за умов дії внутрішнього тиску і не є лімітуючим елементом конструкції за критерієм міцності.

Результати чисельного моделювання свідчать про складний характер напружено деформованого стану композиційної трубчастої конструкції під дією внутрішнього тиску. Поля переміщень і напружень, представлені на відповідних рисунках вище, демонструють нерівномірний розподіл деформацій по довжині та товщині оболонки, що зумовлено особливостями геометрії конструкції та схемою армування. Зокрема, максимальні значення радіальних і осьових переміщень зосереджуються у зонах переходу між окремими конструктивними елементами, що підтверджує необхідність урахування локальних ефектів при проектуванні подібних виробів.

Розподіл напружень у напрямі волокон у спіральних шарах силової оболонки відображає ортотропний характер роботи матеріалу, притаманний композиційним системам. Це вказує на визначальну роль орієнтації волокон у формуванні напруженого стану конструкції та підтверджує доцільність використання шаруватих розрахункових моделей для адекватного опису механічної поведінки композиційних труб. Таким чином, візуалізація результатів моделювання дозволяє не лише кількісно оцінити напруження і переміщення, а й якісно проаналізувати особливості роботи конструкції в умовах експлуатаційного навантаження.

**Висновок.** У роботі проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану композиційної трубчастої конструкції із урахуванням її геометричних параметрів та структури армування. Побудована розрахункова модель дозволила відтворити просторові розподіли переміщень і напружень у матеріалі шаруватої оболонки під дією внутрішнього тиску 1,95 МПа за нормальної та за криогенної температури.

На підставі проведеного візуально-графічного аналізу вдалося встановити характерні зони концентрації напружень. Аналіз полів напружень показав, що їх максима-

льні значення концентруються в зоні переходу робочої частини оболонки у фланці. Максимальні головні та відносні кільцеві напруги, натомість, зосереджені в регулярній зоні в центральній частині моделі

Отримані результати підтвердили, що за розрахункового значення внутрішнього тиску при кімнатній та при криогенній температурі, напруження у матеріалі не перевищують граничних значень міцності, тобто умови міцності конструкції не порушуються.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для уточнення інженерних розрахунків композиційних трубчастих елементів, а також для оптимізації параметрів армування з метою підвищення їх міцності та жорсткості. Запропонований підхід може бути застосований у подальших дослідженнях, спрямованих на аналіз впливу температурних факторів, змін навантаження та конструктивних особливостей на роботу композиційних трубопроводів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Арсеньєв В. М., Козін В. М. Криогенна техніка: основи теорії і розрахунку циклів криогенних установок: навч. посіб.– Суми: Сумський державний університет, 2021. 272с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/07864450-31aa-4a18-a5de-ea718af5778f>
2. Бельмас І., Білоус О., Танцура Г. Визначення напружено-деформованого стану багатопшарового композиту. *Міцність матеріалів та теорія конструкцій*. 2022. № 109. С. 426–440. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.426-440>
3. Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Жигилій Д. О. Моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2019. № 5(1330). С. 10–16. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.02>
4. Кобищан Г. Д., Басова Ю. О. Сучасні композитні матеріали на основі вуглецевих волокон: види, властивості, застосування. *Природно-ресурсний та енергетичний потенціали: напрями збереження, відновлення та раціонального використання : колективна монографія*. 2019. С. 163-172. [http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/8615/1/%d0%9c%d0%be%d0%bd%d0%be%d0%b3%d1%80%d0%b0%d1%84%d1%96%d1%8f\\_%20%d0%9f%d0%94%d0%9f%d0%90\\_2019\\_%d0%9a%d0%be%d0%b1%d0%b8%d1%89%d0%b0%d0%bd\\_%d0%91%d0%b0%d1%81%d0%be%d0%b2%d0%b0.pdf](http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/8615/1/%d0%9c%d0%be%d0%bd%d0%be%d0%b3%d1%80%d0%b0%d1%84%d1%96%d1%8f_%20%d0%9f%d0%94%d0%9f%d0%90_2019_%d0%9a%d0%be%d0%b1%d0%b8%d1%89%d0%b0%d0%bd_%d0%91%d0%b0%d1%81%d0%be%d0%b2%d0%b0.pdf)
5. Манько Т., Літот О., Мурашко В. Аналіз механічних та мікроструктурних характеристик композиційних трубопроводів після впливу тиску та криогенних температур. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Галузеве Машинобудування*. 2025. № 5(154). С. 214–221. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.5.25>
6. Манько Т., Мурашко В. Дослідження характеристик композиційних матеріалів в криогенному середовищі. *XIX Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті» 02–05 червня 2025 р., Варна, Болгарія*. С. 69–75. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/7dc5a42a-c873-4f04-91e8-1a451e6db03b>
7. Манько Т., Мурашко В. Композиційні трубопроводи в сучасному ракетобудуванні. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2025. Т. 34, № 2. С. 95–102.

URL: <https://doi.org/10.15421/452518>

8. Манько Т., Мурашко В. Спосіб оцінки відповідності структури композиційної конструкції проектним характеристикам. *IX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу – 2025»* 17 вересня 2025р, Херсон-Хмельницький. С. 167–169.

URL: <https://dspace.vnmu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/10780/%D0%9B%D0%B5%D0%BF%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BD%20%D0%86.%D0%9C?sequence=1&isAllowed=y>

9. Шевцов О. В., Шевцов В. Ю. Проблемні питання та шляхи їх вирішення при проектуванні композиційних паливних баків. *Проектування системи та аналіз характеристик аерокосмічної техніки*. 2021. Т. 28, № 1. С. 56–64.

URL: <https://doi.org/10.15421/472106>

10. Geng P., Xing J., Wang Q. Analytical model for stress and deformation of multiple-winding-angle filament-wound composite pipes/vessels under multiple combined loads. *Applied Mathematical Modeling*. 2021. Vol. 94. P. 576–596.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.01.034>

11. Material characterization of filament-wound composite pipes / W. Toh et al. *Composite Structures*. 2018. Vol. 206. P. 474–483.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.049>

12. Yu W. A Review of Modeling of Composite Structures. *Materials (Basel)*. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 446. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17020446>

#### REFERENCES

1. Arseniev, V. M., & Kozin, V. M. (2021). Kriohenna tekhnika: osnovy teorii i rozrakhunok tsykliv kriohennykh ustanovok [Cryogenic engineering: Fundamentals of theory and calculation of cryogenic plant cycles]. *Sums'kyi derzhavnyi universytet*. P. 272

<https://essuir.sumdu.edu.ua/items/07864450-31aa-4a18-a5de-ea718af5778f>

2. Belmas, I., Bilous, O., & Tantsura, H. (2022). Vyznachennya napruzhenno-deformovanoho stanu bahatosharovoho kompozytu [Determination of the stress-deformed state of a multilayer composite]. *Mitsnist' materialiv ta teoriya konstruksiy*, (109), P. 426–440.

<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.426-440> [in Ukrainian].

3. Dovgoplov, A., Nekrasov, S., & Zhyhylii, D. (2019). Modelyuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu roz'yemnoho z'yednannya v detalyakh z armovanykh kompozytsiynykh materialiv metodom SEA [Strain-stress states simulation of detachable joint for reinforced composites by FEM]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KHPI. Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh*, (5(1330)), P. 10–16. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.02> [in Ukrainian].

4. Kobyshchan, G. D., & Basova, Yu. O. Suchasni kompozytsiyni materialy na osnovi vuhletsevykh volokon: vydy, vlastyvoli, zastosuvannya [Modern composite materials based on carbon fibers: types, properties, applications]. *Pryrodno-resursnyy ta enerhetychnyy potentsial: napryamy zberezhennya, vidnovlennya ta ratsional'noho vykorystannya : kolektyvna monohrafiya*. 2019. P. 163-172.

[http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/8615/1/%d0%9c%d0%be%d0%bd%d0%be%d0%b3%d1%80%d0%b0%d1%84%d1%96%d1%8f\\_%](http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/8615/1/%d0%9c%d0%be%d0%bd%d0%be%d0%b3%d1%80%d0%b0%d1%84%d1%96%d1%8f_%)

20% d0%9f% d0%94% d0%9f% d0%90\_2019\_% d0%9a% d0%be% d0%b1% d0%b8% d1%89% d0%b0% d0%bd\_% d0%91% d0%b0% d1%81% d0%be% d0%b2% d0%b0.pdf [in Ukrainian].

5. Manko, T., Litot, O., & Murashko, V. (2025). Analiz mekhanichnykh ta mikrostrukturnykh kharakterystyk kompozytsiinykh truboprovodiv pislia vplyvu tysku ta kriogennykh temperatur [Analysis of mechanical and microstructural characteristics of composite pipelines after exposure to pressure and cryogenic temperatures]. *Visnyk Kremenchutskoho Natsionalnoho Universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. Haluzove Mashynobuduvannia*, 5(154), P. 214–221. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.5.25> [in Ukrainian].

6. Manko, T., & Murashko, V. (2025). Doslidzhennia kharakterystyk kompozytsiinykh materialiv v kriogenному seredovyshchi [Investigation of composite material properties in a cryogenic environment]. *XIX Mizhnarodna konferentsiya «Stratehiya yakosti v promyslovosti ta osviti»*. P. 69–75 <https://crust.ust.edu.ua/items/7dc5a42a-c873-4f04-91e8-1a451e6db03b> [in Ukrainian].

7. Manko, T., & Murashko, V. (2025). Kompozytsiyni truboprovody v suchasnomu raketobuduvanni [Composite pipes in modern rocket building]. *Journal of Rocket-Space Technology*, 34(2), P. 95–102. <https://doi.org/10.15421/452518> [in Ukrainian].

8. Manko, T., & Murashko, V. (2025). Sposib otsinky vidpovidnosti struktury kompozytsiinoi konstruktsii proektnym kharakterystykam [Method for assessing the conformity of a composite structure to design characteristics]. *IX Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Suchasni tekhnolohiyi promyslovoho kompleksu – 2025» 17 veresnya 2025r, Kher-son-Khmel'nyts'kyi*. P. 167–169.

[https://dspace.vnmu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/10780/Lepetan\\_I.M?sequence=1](https://dspace.vnmu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/10780/Lepetan_I.M?sequence=1) [in Ukrainian].

9. Shevtsov, O. V., & Shevtsov, V. Yu. (2021). Problemni pytannia ta shliakhy yikh vyrishennia pry proiektuvanni kompozytsiinykh palyvnykh bakiv [Problematic issues and ways to solve them in the design of composite fuel tanks]. *Systemy proektuvannya ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoyi tekhniki*, 28(1), P. 56–64. <https://doi.org/10.15421/472106> [in Ukrainian].

10. Geng, P., Xing, J., & Wang, Q. (2021). Analytical model for stress and deformation of multiple-winding-angle filament-wound composite pipes and vessels under multiple combined loads. *Applied Mathematical Modeling*, 94, P. 576–596.

<https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.01.034> [in English].

11. Toh, W., et al. (2018). Material characterization of filament-wound composite pipes. *Composite Structures*, 206, P. 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.049> [in English].

12. Yu, W. (2024). A review of modeling of composite structures. *Materials (Basel)*, 17(2), P. 446. <https://doi.org/10.3390/ma17020446> [in English].

Received 13.03.2026

Accepted 16.03.2026

Published 31.03.2026

***Theoretical study of a solid composite linerless carbon plastic pipeline  
for cryogenic fuel components***

*The article presents the results of a theoretical investigation of a fully composite linerless carbon fiber reinforced polymer pipeline intended for transportation of cryogenic fuel components. A geometric and computational model of the tubular structure was developed with consideration of its structural configuration, material orthotropy, and reinforcement scheme based on filament winding technology. The stress strain state of the pipeline was analyzed using numerical simulation implemented in the Ansys software environment. The distributions of radial and axial displacements, as well as normal and shear stresses in the principal material directions, were obtained under the action of internal pressure corresponding to operating conditions.*

*The article presents the results of theoretical studies of the design of a fully composite linerless carbon fiber pipeline for cryogenic fuel components. A geometric and computational model of the composite pipe structure was built, taking into account its reinforcement scheme. Based on numerical modeling of the stress-strain state in the Ansys program, the distribution of radial and axial displacements, as well as stresses in the direction of the fibers of the power shell under the action of internal pressure, was determined. The results obtained indicate the orthotropic nature of the deformation of the structure and the significant influence of the fiber orientation on the level of stresses in the material. It is shown that the use of layered models allows us to adequately describe the mechanical behavior of the carbon fiber pipe under operational load conditions. The results of the study can be used to refine engineering methods for calculating composite pipelines and justify design parameters when designing cryogenic fuel supply systems.*

*The simulation results demonstrate a pronounced orthotropic deformation behavior of the composite structure caused by the directional properties of the reinforcing fibers. A significant influence of the fiber orientation and stacking sequence on the magnitude and localization of stresses within the pipe wall was identified. It was established that certain reinforcement angles lead to an increase in circumferential stresses, while others contribute to a more uniform stress distribution, which is essential for improving structural integrity under combined mechanical and thermal loading.*

*The study confirms that layered composite models provide an adequate representation of the mechanical response of carbon fiber pipelines subjected to operational loads and can be effectively applied for predicting critical stress zones. The obtained results contribute to a deeper understanding of the deformation mechanisms of linerless composite pipelines operating at low temperatures and under internal pressure. The proposed modeling approach can be used to refine engineering calculation methods and to substantiate rational design parameters when developing cryogenic fuel supply systems for aerospace and energy applications.*

*Keywords: composite materials; composite pipeline; carbon fiber; stress-strain state; numerical modeling; fiber reinforcement; internal pressure; structural strength.*

**Манько Тамара Антонівна** - професор, доктор технічних наук, професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4146-607X>

**Літот Олександр Володимирович** - доктор філософії, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4449-7349>

**Мурашко Валентин Васильович** - аспірант кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6205-5793>

**Manko Tamara Antonivna** - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Rocket and Space and Innovative Technologies at Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4146-607X>

**Litot Oleksandr Volodymyrovych** - PhD (Rocket science), Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4449-7349>

**Murashko Valentyn Vasylovych** - PhD student, Department of Rocket-Space and Innovative Technologies at Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6205-5793>