

**Богдан Сергійович Завертанний¹, Геннадій Володимирович Пасов²,
Мирослав Сергійович Завертанний³, Володимир Іванович Венжега⁴,
Віра Петрівна Мурашківська⁵**

¹ доктор філософії, старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка», ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» (Чернігів, Україна)

E-mail: zavertannyi@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0001-7492-3663>. **ResearcherID:** [KHD-2575-2024](https://orcid.org/0009-0001-7492-3663)

² кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

³ кандидат технічних наук, науковий співробітник

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: zavertannyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8415-8555>

⁴ кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vivenzhega@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>. **ResearcherID:** [H-3560-2014](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X)

⁵ старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. **ResearcherID:** [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗТЯГУ ПОЛІМЕРНИХ ОБОЛОНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Технології сучасного виробництва полімерних оболонок для рідин мають прогресивний характер, що дає можливість гарантувати високу якість, міцність, екологічність та підвищення механічних характеристик полімерних оболонок для рідин, що є важливим не тільки для харчової, але також хімічної промисловості. Однак є потреба в моделюванні нових типів і конструкцій оболонок, врахування розподілу матеріалу під час формування оболонок та вплив цього на механічні характеристики. Метою роботи є проведення моделювання розтягу полімерних оболонок з поліетилентерефталата під дією внутрішнього тиску та оптимізація процесу проектування полімерних оболонок. У роботі досліджено вплив розподілу матеріалу полімерних оболонок на опір внутрішньому тиску, експериментально досліджено процес руйнування полімерних оболонок під дією внутрішнього тиску та проведено комп'ютерне моделювання процесу. Дослідження проводилися на дослідно-виробничій базі ТОВ «ПЕТ Технолоджиз».

Ключові слова: полімерна оболонка; поліетилентерефталат; моделювання; механічні характеристики; розтяг.

Рис.: 6. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У процесі виробництва полімерних оболонок з поліетилентерефталата методом пневматичного формування важливим фактором є екологічна складова виробництва. Досить поширеним напрямом підвищення екологічності виробництва є вторинна переробка поліетилентерефталата [2-5], але також екологічності виробництва можливо досягти зменшенням кількості відходів і собівартості упаковки. Цього ефекту можливо досягти зменшенням ваги (товщини оболонки з поліетилентерефталата). Для проведення аналізу можливості використання полегшених зразків оболонок необхідно проводити лабораторні дослідження фізичних зразків, або проводити моделювання впливу внутрішнього тиску на поведінку оболонки. Тому отримання результатів математичного моделювання поведінки оболонок, отримання результатів під час лабораторних досліджень, проведення аналізу різності показників та зіставлення результатів моделювання і лабораторних досліджень для подальшого використання у виробництві є актуальною задачею.

Постановка проблеми. У процесі проектування полімерних оболонок неможливо покладатися тільки на досвід конструктора, який використовуючи свої знання у сфері проведення робіт створює той чи інший вид продукції. Для перевірки відповідності продукції необхідним специфікаціям (як приклад – внутрішній тиск, який витримує полімерна оболонка до повної руйнації) проводиться виготовлення прототипів [1] (фізичних

зразків пресформи), проводиться дослідне пневматичне формування оболонок та їх подальше випробування, лабораторні дослідження, можлива оптимізація конструкцій і внесення змін до документації. Це досить тривалий і трудомісткий процес. Для його скорочення, або повного виключення з процесу досліджень, досить логічною є ідея застосувати методи комп'ютерного моделювання поведінки полімерних оболонок. Як приклад проведення моделювання поведінки під дією тиску методом скінчених елементів.

Проведення порівняння результатів лабораторних досліджень і результатів моделювання дозволить зробити висновки щодо адекватності результатів моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [2; 3] розглядається екологічний аспект переробки полімерних оболонок з поліетилентерефталата, але не розглянуто питання можливості зменшення кількості відходів. Було обговорено основні особливості використання ПЕТ в пакувальній промисловості. У дослідженні [4] оцінювалися явища деградації, які відбуваються у життєвому циклі поліетилентерефталата. Розкриваються питання стійкості до атмосферних чинників поліетилентерефталата.

Механічні властивості полімеру розглядаються у [5-6], але вони розглядаються для волокна, виготовленого з відходів оболонок [5] з поліетилентерефталата у будівництві, а в [6] розглядається процес деградації полімеру. Автори у [7] досліджують екологічні аспекти впливу мікропластику на живі організми. Використання полімерних оболонок з поліетилентерефталата розглянуто у [8].

Але у роботах не розглянуте проєктування полімерних оболонок, дослідження механічних характеристик полімерних оболонок та можливості зменшення їхньої ваги в разі використання як упаковки.

Мета статті. Проведення лабораторних досліджень фізичних зразків полімерних оболонок, отриманих методом прототипування на виробничому обладнанні, виконання математичного моделювання поведінки полімерних оболонок під тиском та порівняння результатів дадуть нам інформацію щодо адекватності результатів математичного моделювання в зіставленні з дослідженням фізичних зразків. Також потрібно провести дослідження впливу розподілу полімерного матеріалу (товщини полімерної плівки) на механічні властивості полімерної оболонки.

Використання такого підходу дозволить забезпечити покращення якості розподілення матеріалу, міцності оболонок при зменшенні їхньої ваги та зменшенні матеріальних затрат на проведення дослідів.

Виклад основного матеріалу. Під час використання полімерних оболонок для харчових рідин, для довготривалого їх збереження, в оболонки додають надлишковий тиск з використанням азоту, або вуглекислого газу (газовані напої). Під час фасування та зберігання напоїв на оболонку діє тиск, який може досягати 8 бар (при сильному нагріванні рідин, насичених вуглекислим газом). При неправильній геометрії оболонки, нерівномірному розподілу матеріалу з плином часу може відбуватися руйнація оболонки та втрата продукту, що призводить до фінансових та репутаційних втрат виробника.

Для визначення механічних характеристик спроектованих оболонок проводиться процес прототипування – виготовлення тестового зразка пресформи для формування оболонок, пневматичне формування експериментальних партій полімерних оболонок, проведення лабораторних досліджень, корегування розподілу матеріалу по тілу оболонки, повторні формування та лабораторні досліді.

Для виконання дослідження процесу розтягу полімерних оболонок на базі провідного підприємства, передове підприємство у сфері виготовлення обладнання для формування полімерних оболонок та виконання їх досліджень, ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» [1] було проведено виготовлення прототипного зразка прес-форми, сформована пробна партія полімерних оболонок та проведені лабораторні дослідження оболонок під дією внутрішнього тиску. Усі дослідження проводилися на обладнанні лабораторії ТОВ «ПЕТ Технолоджиз».

Опираючись на досвід налагоджувальників пневмоформуючого обладнання, на видувній машині УПФ-30 було сформовано першу дослідну партію полімерних оболонки. На обладнанні лабораторії, а саме на тестері внутрішнього тиску РРТ3000, було проведено дослід на внутрішній тиск, витримуваний оболонками до повного руйнування. На рис. 1 графічно показано внутрішній тиск у бар, при якому відбулася руйнація оболонки, по вибірці з 10 зразків.

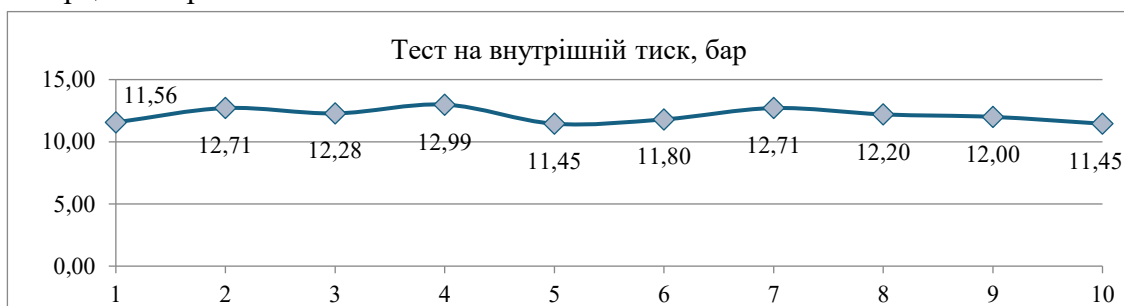


Рис. 1. Результати тестування полімерних оболонки на внутрішній тиск до їх повної руйнації за умови «оптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 показано руйнацію зразків. Опираючись на внутрішню специфікацію ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» та досвід попередніх лабораторних досліджень, зроблено висновки, що руйнація зразків відповідає необхідним вимогам до полімерних оболонки такого типу, а саме – руйнація відбулася по боковій стінці, характер розривів відповідає нормальному розподіленню полімерного матеріалу по тілу пляшки.

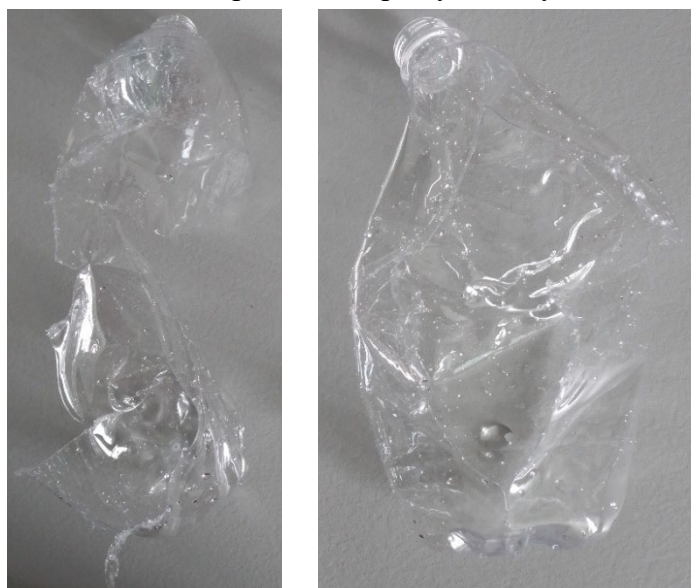


Рис. 2. Місця руйнування полімерних оболонки за умови «оптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

Після проведення досліджень та аналізу даних було відредаговано 3D-модель оболонки. Провівши виміри товщини стінок полімерної оболонки та визначивши закономірності в розподіленні матеріалу, були внесені корективи товщини стінок 3D-моделі. Товщина матеріалу в литниковій зоні – 1,5 мм (литникова зона – місце на преформі, яке утворюється після виготовлення преформи та слугує орієнтиром місця дії розтягуючого штоку пневмоформувальної машини).

Наступним кроком стало проведення математичного моделювання розтягу моделі полімерної оболонки методом скінчених елементів у середовищі SOLIDWORKS Simulation [9]. Проведено розподіл навантажень на оболонку з врахуванням тиску руйнації фізичних зразків 12 бар. Кількість вузлів сітки становить 588 396, кількість елементів 300 786. На рис. 3, *а* показано досліджувану 3D-модель, на рис. 3, *б* – сітку скінчених елементів. Розрахунок проводився з урахуванням великих переміщень та деформацій. Матеріал оболонки – поліетилентерефталат.



Рис. 3. Параметри моделювання методом скінчених елементів:

а – фіксація елемента та вказання навантажень; *б* – сітка скінчених елементів
Джерело: розроблено авторами.

Результати моделювання наведені на рис. 4. Рисунок 4, *а* показує напруження, які виникали в полімерній оболонці, рис. 4, *б* – переміщення, а рис. 4, *в* – деформації, які виникли під дією внутрішнього тиску.

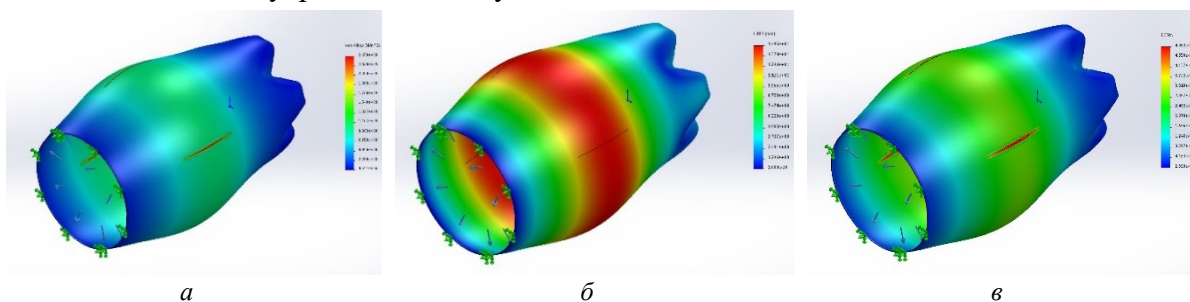


Рис. 4. Напруження (*а*), переміщення (*б*) та деформації (*в*), отримані в результаті моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно до результатів моделювання, руйнація оболонки відбулася під тиском 12 бар, що відповідає результатам експериментальних досліджень. Тобто модель і дослід підтвердили свою адекватність.

Наступним кроком була зміна товщини матеріалу в литниковій зоні до товщини 3 мм. Після проведення аналогічних досліджень з тими самими умовами щодо матеріалу і тиску в середовищі SOLIDWORKS Simulation результати моделювання були аналогічні вказаним.

Надалі проведено підбір режимів пневмоформування та виконано пробну партію полімерних оболонок з аналогічним розподіленням матеріалу до попереднього дослідження, окрім товщини матеріалу в литниковій зоні (3 мм замість 1,5 мм). На обладнанні лабораторії, на тестері внутрішнього тиску PPT3000, було проведено повторний дослід на внутрішній тиск, витримуваний оболонками до повного руйнування. На рис. 5 графічно показано внутрішній тиск у бар, при якому відбулася руйнація оболонки, по вибірці з 10 зразків.

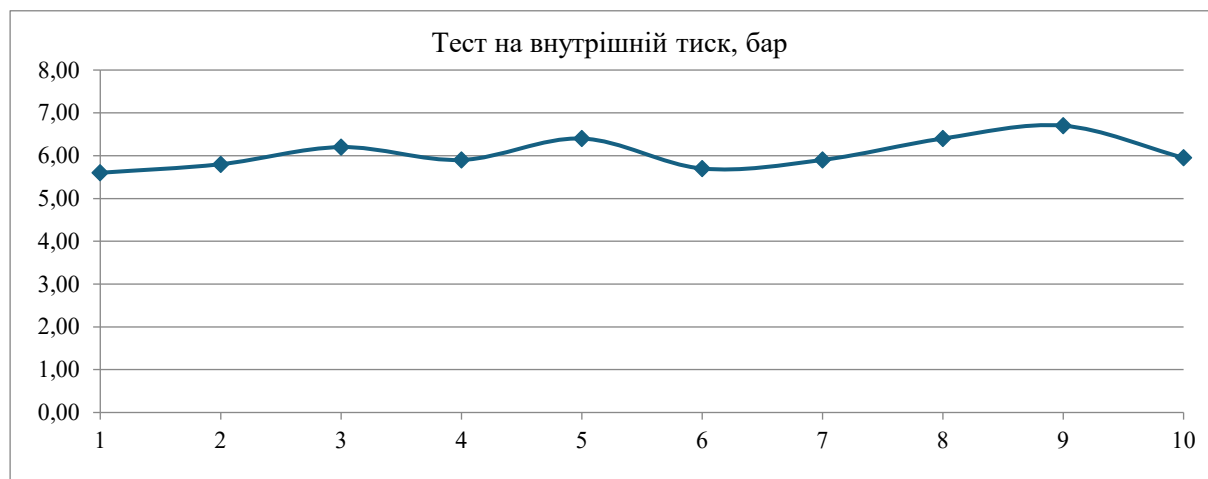


Рис. 5. Результати тестування полімерних оболонок на внутрішній тиск до їх повної руйнації за умови «неоптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 6 показано руйнацію зразків. Руйнування матеріалу відбулося в литниковій зоні, що є недопустимим за внутрішньою специфікацією.



Рис. 6. Місця руйнування полімерних оболонок за умови «неоптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

У цьому випадку результати моделювання і результати лабораторних досліджень реальних полімерних оболонок суперечать один одному. Впливає невідповідність механічних властивостей полімерних оболонок з поліетилентерефталата фізичних зразків у порівнянні з результатами моделювання. Це може свідчити про ідеалізацію механічних властивостей полімеру незалежно від товщини у програмному продукті SOLIDWORKS Simulation. Реальні ж лабораторні дослідження показали збільшення крихкості полімеру зі збільшенням його шару.

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано реальну характеристику розподілу полімерного матеріалу (поліетилентерефталат) під час пневмоформування оболонки, що дає можливість відійти від ідеалізації розподілу полімерного матеріалу під час математичного моделювання процесу розтягу та оптимізувати процес проектування полімерних оболонок. Виконано моделювання розтягу полімерних оболонок під дією внутрішнього тиску методом скінчених елементів, проведено порівняння експериментальних результатів із результатами моделювання.

Визначено недостовірність результатів моделювання методом скінчених елементів при підвищених параметрах товщини матеріалу оболонки. У місці литникової зони при підвищеній товщині матеріалу відбувається першочергове руйнування матеріалу без його розтягу, що неможливо виявити під час моделювання методом скінчених елементів. Можливою причиною цього може бути ідеалізація механічних характеристик полімерного матеріалу програмою незалежно від товщини матеріалу.

Враховуючи, що матеріальні затрати на проведення експериментальних досліджень поведінки полімерних оболонок досить значні, а проведення математичного моделювання поведінки полімерних оболонок під тиском на порядок дешевше, то доопрацювання моделі побудови сітки для методу скінчених елементів, а саме зміни механічних характеристик матеріалу залежно від товщини, суттєво вплине як на час виконання досліджень, так і на їхню собівартість.

Список використаних джерел

1. ПЕТ Технологізі (2024, 16 травня). Інновації у пакуванні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pet-eu.com/uk/zahodi/pet-technologies-vzyali-uchast-u-konferentsiyi-innovatsiyi-u-pakuvanni>.
2. Дослідження безпечності використання ПЕТ пляшок із вторинної сировини для пакування харчових продуктів / С. Павлюк, Т. Філінська, І. Суха, А. Філінська // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4 (34). – С. 188–194. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-188-194](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-188-194).
3. Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review / Benyathiar Patnarin, Kumar Pankaj, Carpenter Gregory, Brace John, Mishra, Dharmendra // *Polymers (Basel)*. – 2022. – № 14. – P. 2366. DOI: [10.3390/polym14122366](https://doi.org/10.3390/polym14122366).
4. Nisticò, Roberto. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry / Roberto Nisticò // *Polymer Testing*. – 2022. – Vol. 90. – 106707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106707>.
5. A Literature Review on Mechanical Properties of Waste PET Bottle Based Fibre / Somwanshi Devendra Sharma, Vijay Prakash Sharma, Sikha Sharma, Kalpit Jain // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2022. – 1084. DOI [10.1088/1755-1315/1084/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012069).
6. Assessment of the Mechanical Properties of Pet Polymer Material from Recovered Plastic Bottles / Irene Villafañe, Colin Keogh, Thomas Curran, Emmanuel Reynaud // *Present Environment and Sustainable Development*. – 2018. – № 12. – Pp. 203-214. DOI: [10.2478/pesd-2018-0016](https://doi.org/10.2478/pesd-2018-0016).
7. Olam, Mikail. Mechanical and Thermal Properties of HDPEPET Microplastics, Applications, and Impact on Environment and Life / Olam Mikail // *Advances and Challenges in Microplastics*. – 2023. – Pp. 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110390>.
8. Verkhivker, Ya. Use of consumer polymer C-PET containers in food production technologies / Yakov Verkhivker, Walery Okulicz-Kozaryn, Olena Myroshnichenko // *Technology audit and production reserves*. – 2023. – № 1. – Pp. 27-30. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.275074>.
9. Ворошук, В. Я. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем: навч. посіб. / В. Я. Ворошук, Т. М. Вітенько. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. – 164 с.

References

1. PET Technologies. (2024, May 16). *Innovations in packaging [Innovatsii u pakuvanni]*. <https://pet-eu.com/uk/zahodi/pet-technologies-vzyali-uchast-u-konferentsiyi-innovatsiyi-u-pakuvanni>.
2. Pavliuk, S., Filinska, T., Sukha, I., & Filinska, A. (2023). Research on the safety of using pet bottles from secondary raw materials for food packaging [Doslidzhennia bezpechnosti vykorystannia PET pliashok iz vtorynnoi syrovyny dlia pakuvannia kharchovykh produktiv]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4(34)), 188–194.
3. Benyathiar, P. & Kumar, P. & Carpenter, G. & Brace, J. & Mishra, D. (2022). Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. *Polymers*, 14, 2366. DOI: [10.3390/polym14122366](https://doi.org/10.3390/polym14122366).
4. Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90, 106707. DOI: [10.1016/j.polymeresting.2020.106707](https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106707).
5. Somwanshi, D., Sharma, V. P., Sharma, S. & Jain, K. (2022). A Literature Review on Mechanical Properties of Waste PET Bottle Based Fibre. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1084, 012069. DOI: [10.1088/1755-1315/1084/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012069).

6. Villafañe, I., Keogh, C., Curran, T. & Reynaud, E. (2018). Assessment of the Mechanical Properties of Pet Polymer Material from Recovered Plastic Bottles. *Present Environment and Sustainable Development*, 12, 203-214. DOI:10.2478/pesd-2018-0016.
7. Olam, M. (2023). Mechanical and Thermal Properties of HDPEPET Microplastics, *Applications, and Impact on Environment and Life*. DOI:10.5772/intechopen.110390.
8. Yakov, V., Okulicz-Kozaryn, W. & Myroshnichenko, O. (2023). Use of consumer polymer C-PET containers in food production technologies. *Technology audit and production reserves*, 1, 27-30. DOI:10.15587/2706-5448.2023.275074.
9. Voroshchuk, V.Ia., Vitenko, T.M. (2021). *Solidworks in tasks of 3D modeling and engineering of technical systems [Solidworks u zavdanniakh 3D modeliuвання ta inzhynirynhu tekhnichnykh system]*. FOP Palanytsia V.A.

Отримано 26.11.2024

UDC 678.7:539.3

**Bohdan Zaveretannyi¹, Gennadiy Pasov², Myroslav Zaveretannyi³,
Volodymyr Venzheha⁴, Vira Murashkovska⁵**

¹ PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zaveretannyi@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0001-7492-3663>. **ResearcherID:** [KHD-2575-2024](https://orcid.org/0009-0001-7492-3663)

² PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

³ PhD, researcher of E.O. Paton Electric Welding Institute (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zaveretannyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8415-8555>

⁴ PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vivenzhega@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>. **ResearcherID** [H-3560-2014](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X)

⁵ Senior Lecturer of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. **ResearcherID** [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

EXPERIMENTAL STUDY AND FINITE ELEMENT MODELING OF TENSILE DEFORMATION IN POLYMER SHELLS

Contemporary production of polymer shells for liquids involves advanced technological solutions, ensuring high quality and adequate mechanical properties for applications in the food and chemical industries. However, current trends aim to reduce shell weight while improving their mechanical characteristics through optimized geometric parameters. Consequently, there is a growing need for modelling new types of shells and their designs, taking into account material distribution during shell formation and its impact on mechanical properties.

When designing polyethylene terephthalate (PET) polymer shells, it is impractical to rely solely on previous development experience to create new product types. To verify product compliance with the required specifications, prototypes (physical samples of moleds) are manufactured, followed by the production of experimental shell samples and their subsequent testing, laboratory research, potential optimization of designs, and documentation changes, which is a time-consuming, costly, and lengthy process.

Experimental studies were conducted to obtain real-world characteristics of the distribution of polymeric material (polyethylene terephthalate) during the pneumatic forming of shells. This enables a departure from the idealized distribution of polymeric material during mathematical modelling of the stretching process and optimizes the design process of polymer shells. Finite element modelling of the stretching of polymer shells under internal pressure was performed, and the experimental results were compared with the simulation results.

This work presents an experimental study and mathematical modelling of the stretching process of polyethylene terephthalate polymer shells under internal pressure. The research was conducted at the research and production base of LLC "PET Technologies". The influence of the material distribution of polymer shells on resistance to internal pressure was investigated. The process of destruction of polymer shells under internal pressure was experimentally studied and demonstrated, and computer simulation of the process was carried out.

Keywords: polymer shell; polyethylene terephthalate; modelling; mechanical properties; tensile deformation.

Fig.: 6. **References:** 9.