

*A the same time on the imitational modeling stage of state of paper and paperboard production technological system a necessity appears to give the models of separate system elements as two components: statics and dynamics which in their turn can be divided in separate groups and classes.*

*The dynamic component of all technological system can be opened only with use of computers by considering the mathematical models of its every element in intercommunication, i.e. with use of elements conjugation models of complex technological system.*

**Keywords:** complex system, system element, system of water consumption, structural system model, graph theory, topological analysis method.

#### **References**

1. Ploskonos, V.G. (2016). "Research methodology of complex system functioning dynamics of paper and paperboard production", *Visnyk NTUU "KPI" Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozberezhennja*, no 1(15), pp. 71–74.
  2. Ivahnenko, A.G. (1976). "Long-term prognosis and complex system control", *Kyev, "Tehnika"*, 311 p.
  3. Kykotj, V.S. and Ploskonos, V.G. (1986). "Characteristics identification of complex projecting systems with use of selforganisation and topological analysis method", *Avtomatika*, no 3, pp. 34–42.
- 

УДК 678.025.2

**ПОГОРІЛИЙ О. В., магістр; СІДОРОВ Д. Е., к.т.н., доц.;  
КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., проф.; КАЗАК І. О., к.п.н., доц.**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

## **ЗОНОВАНИЙ АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПІД ЧАС РОЗІГРІВАННЯ ПЕТ-ПРЕФОРМ**

*Виконано аналіз температурних режимів при формуванні виробів з ПЕТ-преформ по трьох характерних зонах за умови впливу конвективного нагріву. Розподіл температур по довжині ПЕТ-преформ розраховано з використанням методу інтерполювання кусково-кубічними поліномами. Вивчено зміну температури в часі в кожній зоні ПЕТ-преформи. Виявлено, що температури змінюються в часі за експоненціальним законом, а нагрівання відбувається по всіх зонах ПЕТ-преформи рівномірно до критичної температури формування. Наведено графік зміни температури по довжині ПЕТ-преформи для трьох характерних шарів: зовнішньої поверхні, середнього шару і внутрішньої поверхні ПЕТ виробу.*

**Ключові слова:** ПЕТ-преформа, конвекція, температурні режими, формування, економічна функція.

© Погорілий О. В., Сідоров Д. Е., Колосов О. Є., Казак І. О., 2017.

**Постановка задачі.** Серед методів виробництва виробів з поліетилентерефталату (ПЕТ), ймовірно, найбільш популярним, є метод пневмоформування з попереднім розігрівом заготовок. Цей процес базується на використанні структурно аморфних напівфабрикатів, так званих преформ, які попередньо отримують методом лиття під тиском зі гранульованого ПЕТ.

Нагрівання ПЕТ-преформ відбувається до температури вище температури скловання, яка становить близько 80 °С для більшості ПЕТ-композицій. Цей етап, як правило, здійснюється як за допомогою інфрачервоних обігрівачів, так і за умови конвективного нагріву. На другому етапі, ПЕТ-преформа розтягується з використанням циліндричного стрижня, і витягується з використанням двох рівнів тиску повітря. Виріб формується і охолоджується у прес-формі, температура якої регулюється за допомогою рідини, яка рухається в охолоджуючих каналах.

Умови нагрівання, які контролюють розподіл температури ПЕТ-преформи, сильно впливають на кінематику видування, і, отже, розподіл товщини виробу. Температурний стан ПЕТ-преформи також впливає на орієнтацію макромолекул у ПЕТ-виробі, яка індукована двохосьовим розтягуванням, що, в свою чергу, впливає на механічні, оптичні і бар'єрні властивості кінцевого виробу [1].

Отже, найбільш істотними параметрами, що впливають на основні вихідні показники готового виробу є температурні режими, які важливо контролювати на протязі всього циклу виробництва ПЕТ-виробу.

**Аналіз попередніх досліджень.** Загальною проблемою є розподіл температури ПЕТ-преформи в процесі її формування. Дослідження наукових розробок в області формування ПЕТ-виробів свідчить про те, що

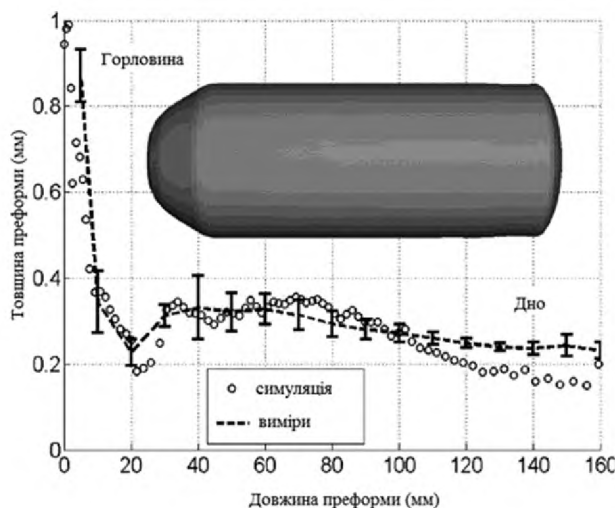
сучасні технічні засоби і методи моделювання режимів формування та температурних полів ПЕТ-преформ і виробів з ПЕТ стали доступні з кінця двадцятого сторіччя.

У праці [2] запропоновано спосіб оптимізації температурних параметрів для визначення оптимального профілю товщини ПЕТ-виробу, враховуючи необхідний розподіл товщини стінки для методу видувного формування. Недоліком цього підходу є значна ресурсоемність обчислень.

У 2014 році Ю. Ло, Люк Шевальє, Франсуа Утеза, Хавер Ніколя [3] дослідили початкові умови нагріву та температурні ефекти (теплообмін з повітрям, теплопровідність), які мають важливий вплив на процеси формування ПЕТ-виробів. У рамках цієї роботи запропоновано чисельне моделювання інфрачервоного нагріву з урахуванням конвекції повітря навколо ПЕТ-преформи у наближенні 2D-моделювання. Оскільки ця робота пропонує спрощений підхід, тому виключає дослідження температурних режимів по всій довжині ПЕТ-преформи та на різних поверхнях і шарах.

На сторінках праці [4] запропоновано автоматичну оптимізацію геометрії заготовки (початкова форма і товщина) в умовах нагріву з використанням нелінійного алгоритму обмеження послідовного квадратичного програмування. Надійність методу обговорювалася шляхом порівняння з результатами експериментів, проведених в промислових умовах. Цікаво відзначити, що автори поставили під сумнів актуальність мети, обраної для оптимізації.

Типові результати моделювання процесу видувного формування наведено на рисунку 1.



**Рис. 1 – Розподіл товщини стінки ПЕТ-виробу по довжині після формування**

За даними, що наведені, виконується порівняння розподілу товщини стінок, що обчислені, і товщини стінок, які були отримані при виробництві виробу. Експериментальні дані були отримані на наборі з трьох випробувань кожне. Відзначається позитивне узгодження параметрів уздовж більшої частини виробу (помилка складає менш за 15 %) [5].

Незважаючи на наявність наукових досліджень у сфері формування ПЕТ-виробів, в тому числі, при конвективному розігріві, слід зазначити те, що всі розглянуті підходи базуються на дослідженні температурних ефектів, які мають найбільший вплив на результат формування, моделюють теплові умови лише циліндричної частини ПЕТ-преформи, але опускають момент розподілу температури по різних зонах виробу та коливання температури у межах реалізації технологічного процесу, що як відомо, є основним фактором впливу на товщину стінки виробу при формуванні. Спроби врахування всіх температурних факторів на тривимірних моделях призводять до ресурсоемних розрахунків.

**Мета статті.** В рамках даної роботи пропонується методика дослідження температурних режимів формування ПЕТ-виробів з урахуванням принципу зонування. Виконання розрахунків по характерних зонах ПЕТ-виробу значно зменшує кількість розрахункових дій і не накладає суттєвих обмежень на потрібні обчислювальні ресурси.

Для цього вирішуються наступні завдання: визначити температурну залежність від часу в кожній зоні ПЕТ-виробу; визначити зміни температури по довжині ПЕТ-преформи для зовнішньої поверхні, серединного шару і внутрішньої поверхні ПЕТ-преформи.

**Виклад основного матеріалу.** Принцип зонування не обмежує кількість характерних зон, на які можливо поділити ПЕТ-виріб. З метою спрощення розрахункових дій, об'єкт умовно поділили на три характерні зони: горловина, середня частина, дно. Таким чином, для того, щоб описати розподіл товщини і температури по довжині виробу, розглядали три змінні оптимізації. Вони відповідають трьом точкам, розташованим по характерним зонам виробу, як показано на рисунку 2.

Розподіл температури розраховувався по трьох характерних зонах ПЕТ-преформи. Для визначення зміни температури по довжині ПЕТ-преформи використаний метод інтерполювання кусково-кубічними поліномами [6]. Для того, щоб забезпечити точну інтерполяцію, температура на горловині ПЕТ-преформи не підлягла зміні і була фіксована на рівні 80 °С, що умовно відповідає температурі скловання ПЕТ-матеріалу. Дійсно, протягом всієї стадії нагрівання, горловина ПЕТ-преформи розташована в терморегульованому тримачі і захищена від інфрачервоного випромінювання. Це технологічно спрямовано на запобігання будь-якої деформації горловини виробу під час процесу формування.



Рис. 2 – Розподіл температури по довжині ПЕТ-преформи

Передбачалося, що початкова температура була рівномірною по всій товщині ПЕТ-преформи і становила 20 С, що також технологічно вірно.

Змінні були обмежені використанням верхньої і нижньої меж: температурою переходу ПЕТ-матеріалу у склоподібний стан і температурою кристалізації ПЕТ.

Інші дані, що були використані для чисельного моделювання були узгоджені з [3]. Пристрій інфрачервоного нагріву був змодельований у 2D наближенні, чого достатньо при використанні принципу зонування. На розглянутих характерних зонах, потік інфрачервоного випромінювання накладався на рівні 7900 Вт/м<sup>2</sup>. Інші теплові граничні умови були адіабатичними і початкова температура повітря дорівнювала 293 К, коефіцієнт тепловіддачі (для наведених прикладів) 16 Вт/(м<sup>2</sup> °С).

Результат розрахунку зміни температури поверхні ПЕТ-преформи від часу інструментами моделювання SimScale [7] наведено на рисунку 3. Видно, що розподіл температури від часу підкоряється класичним експоненціальним законам нагріву-охолодження. Нагрівання відбувається по всіх характерних зонах ПЕТ-преформи рівномірно до критичної температури формування.

Можна бачити, що температура в зоні дна і горловини ПЕТ-преформи значно відрізняються. Розбіжність температур по характерних зонах в даному випадку досягає 14 %. Таким чином, за рівних умов, товщина відформованого ПЕТ-виробу в зоні дна буде вищою, що і реалізується на більшості ПЕТ-пляшок. Корегування цього недоліку може бути здійснено за рахунок контролю над інтенсивністю колімованого теплового випромінювання від інфрачервоних нагрівачів.

Температура ПЕТ-преформи знаходиться під сильним впливом конвекції. Розрахунки показують, що зменшення коефіцієнта тепловіддачі за рахунок виключення вимушеної конвекції призводить до підвищення різниці температур по характерних зонах до 40 %

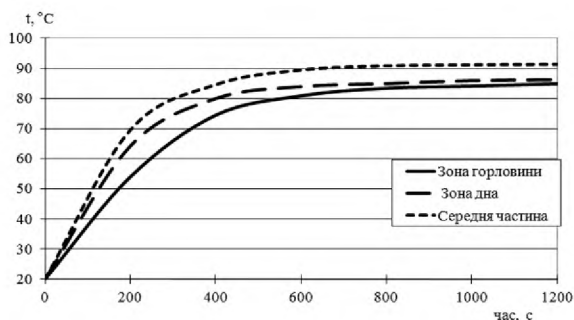


Рис. 3 – Температурна залежність від часу в кожній зоні преформи

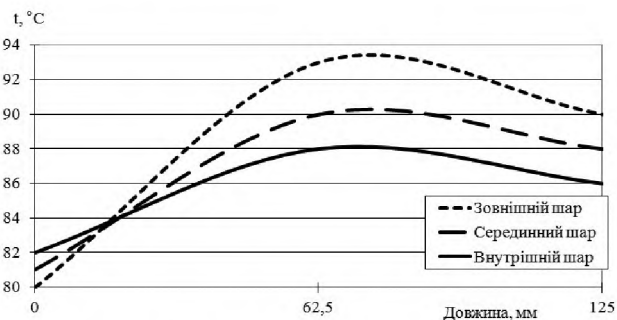


Рис. 4 – Зміна температури шарів по довжині ПЕТ-преформи

На рисунку 4 наведено розподіл температури шарів ПЕТ-преформи по довжині, якій відповідає часу нагріву 120 с. За такий час перебування ПЕТ-преформи в зоні нагріву всі шари набували температури вищої за температуру склювання, проте нижчої за температуру в'язкої течії.

Графік зміни температури по товщині ПЕТ-преформи по характерних зонах (час нагріву 40 с) наведено на рисунку 5.

Як можна бачити, температурні умови по зонах мають суттєві різниці. Зона горловини, яка частково контактує з охолодженими елементами конструкцій і знаходиться під кутом к діючому колімованому випромінюванню має суттєво нижчі температури ніж середня частина ПЕТ-преформи. Максимальна різниця температур в цьому випадку може доходити до 47 %.

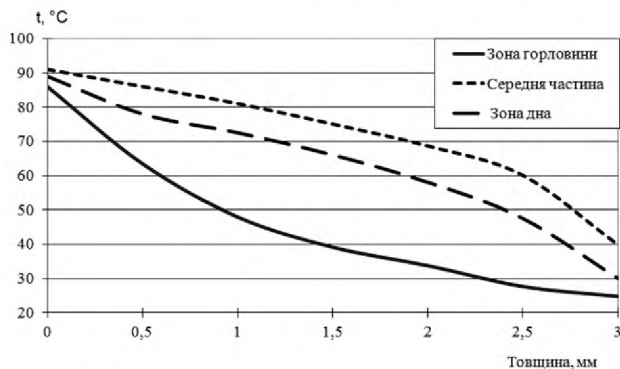


Рис. 5 – Розподіл температури по товщині ПЕТ-преформи за характерними зонами

Зона дна теж розташована під кутом до дії колімованого випромінювання, проте, вона не контактує з елементами конструкції. Тому тут максимальна різниця температур в порівнянні з середньою частиною ПЕТ-преформи складає біля 14 %.

Таким чином, і у зоні дна, і у зоні горловини слід передбачити додаткові технологічні засоби для забезпечення зниження різниці температур по характерним зонам ПЕТ-преформи.

За умови, що всі шари та зони набули температуру, вище за температуру склювання ПЕТ-матеріалу, різниця температур по товщині в центральній області становить близько 3 %; в зоні дна та горловини, різниця складає близько 4 % і 3 %, відповідно

**Висновки.** Таким чином показано, що аналіз температурних режимів розігріву ПЕТ-преформи можна виконати за принципом зонування. Застосування принципу зонування не обмежує кількість і довжину характерних зон ПЕТ-виробу: від звичайного перерізу до зон загальної характерної геометрії. Інтерполювання температурних параметрів по довжині ПЕТ-виробу може бути в принципі виконано в будь-який обраний дослідником спосіб. Ці два фактора дають можливість вибору прийняттого компромісу між ресурсоемісністю, часом виконання обчислень і точністю отриманих результатів

#### Список використаної літератури

1. Сідоров Д. Е. Аналіз температурних режимів формування пет-виробів / Д. Е. Сідоров, О. Є. Колосов, О. В. Погорілий, А. О. Гур'єва // Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки» (Київ, 11-12 червня 2015 р.): зб. тез доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 82–83
2. Ling-Ying Pan, Mao-Sheng Zhan, Kai Wang. Journal: Polymer Engineering and Science-POLYM ENG SCI, 1996. – № 36. – 138 pp.
3. Yun Mei Luo, Luc Chevalier, Françoise Utheza and Xavier Nicolas. Simplified Modelling of the Infrared Heating Involving the Air Convection Effect before the Injection Stretch Blowing Moulding of PET Preform Material Forming ESAFORM 2014, May 2014, Espoo, Finland. Jari Larkiola, 611 – 612, pp. 844-851, 2014, Key Engineering Materials. <10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.844>. <hal-01077292>

4. Francis Thibault. Polymer Engineering and Science (Impact Factor: 1.52). – 03/2007. – 47(3). – 87 pp.
5. Luo, Y.M., Chevalier, L., Utheza, F. Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis, Nantes, France, 2–4 July, 2012.
6. Бахвалов Н. С. Численные методы: учеб. пос. для студ. / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Лаборатория знаний, 2003. – 632 с
7. <https://www.simscale.com/>

Надійшла до редакції 23.08.2016

---

Poghorilyj O. V., Sidorov D. E., Kolosov O. Je., Kazak I. O.

## ZONED ANALYSIS TEMPERATURE WHEN HEATING OF PET-PREFORMS

*The analysis of the temperature conditions at the time of molding of articles PET-preforms in three characteristic zones, taking into account convection heating. The temperature distribution along the length of PET preforms calculated using the interpolation method piecewise cubic polynomials. The change in time of the temperature in each zone of PET-preforms was investigated. It is shown that temperatures vary over time exponentially, and the heating occurs in all areas of the PET-preform uniformly to the critical temperature. Shows the variation of temperature for the three layers: the outer surface, of the core layer and the inner surface of the PET-preforms*

**Keywords:** PET-preform, convection, temperature regimes, molding, economic function.

### References

1. Sidorov, D., Kolosov, O., Poghorilyj, O., Gurieva, A. (11–12 June, 2015). Analysis of temperature regimes of formation of pet products. All-Ukrainian scientific-practical conference Effective processes and equipment of chemical production and packaging technology. Proc. Theses extra. Kiev, P. 82–83.
  2. Ling-Ying Pan, Mao-Sheng Zhan, Kai Wang. (1996). Journal: Polymer Engineering and Science – POLYM ENG SCI. No. 36. 138 pp.
  3. Yun Mei Luo, Luc Chevalier, Françoise Utheza and Xavier Nicolas (May 2014). Simplified Modelling of the Infrared Heating Involving the Air Convection Effect before the Injection Stretch Blowing Moulding of PET Preform Material Forming ESAFORM 2014, Espoo, Finland. Jari Larkiola, 611–612, pp. 844–851, Key Engineering Materials. <10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.844>. <hal-01077292>
  4. Francis Thibault (03/2007). Polymer Engineering and Science (Impact Factor: 1.52). 47(3). 87 pp.
  5. Luo, Y.M., Chevalier, L., Utheza, F. (2–4 July, 2012). Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis, Nantes, France.
  6. Bakhvalov, N.S., Zhidkov, N.P., Kobelkov, G.M. (2003). Numerical methods: studies. pos. for students. Moscow. Knowledge Laboratory. 632 p.
  7. <https://www.simscale.com>
- 

УДК 678.025.2

СІДОРОВ Д. Е., к.т.н., доц.; КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., проф.; ГУР'ЄВА А. О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕТ-ВИРОБІВ У ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ

*Запропоновано методику оперативного оцінювання геометричних параметрів ПЕТ-виробу у процесі його формування з ПЕТ-преформи. Виконано аналіз процесу виготовлення ПЕТ-пляшок ємністю 1 л і 0,5 л. Складені залежності для визначення ступеня витягування та товщини стінки на всіх фазах і етапах виготовлення ПЕТ-пляшки.*

**Ключові слова:** преформа, ПЕТ-вироби, ступінь витягування, формування

© Сідоров Д. Е., Колосов О. Є., Гур'єва А. О., 2017.

**Постановка проблеми.** У звичайній високошвидкісній ротаційній машині для виробництва пляшок з поліетилентерефталату (ПЕТ) розігріті в камері нагріву ПЕТ-преформи протягом певного часу залишаються