

УДК 621.798

## МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЕТ-БУТЛІ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИДУВУ

Колосков В.Ю.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.; Колоскова Г.М.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.;  
Борисенко Ю.Д.<sup>1</sup>; Автуєвич А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна;

<sup>2</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

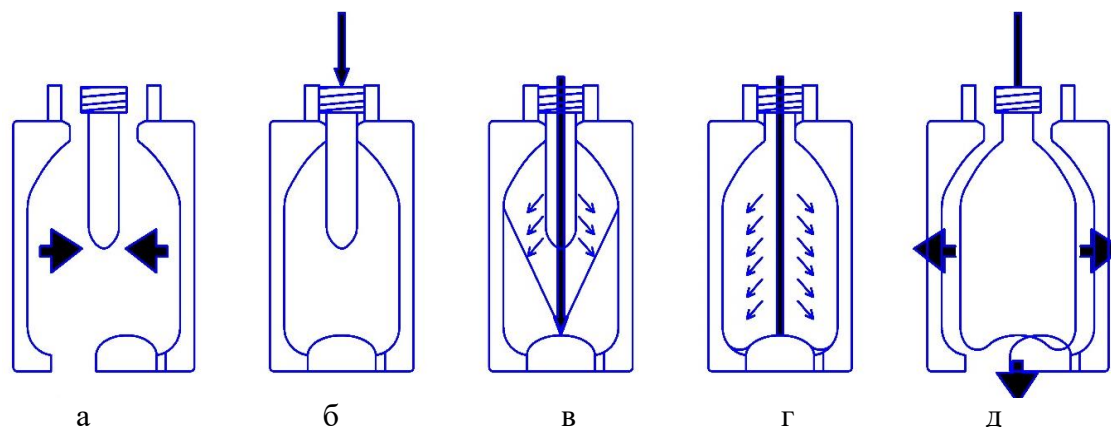
В умовах російської військової агресії негативного впливу зазнали всі сфери економіки України. Виникають суттєві ризики для безпеки населення, зокрема у сфері постачання питної води, що є критичним ресурсом для забезпечення людської життєдіяльності. При цьому одним з ключових елементів системи постачання питної води є її пакування. Сьогодні для розливу безалкогольних напоїв, у тому числі мінеральної води, широко застосовують пластикові пляшки, переваги яких полягають у тому, що вона є прозорою, перешкоджає проникненню пари, повітря та сторонніх запахів, але водночас легша і менш схильна до механічних впливів. Транспортування готової упаковки становить складну проблему, також зі зростанням вартості палива зростає й вартість цих перевезень. А накопичення великих обсягів відпрацьованої упаковки при неможливості її утилізації складає серйозну екологічну проблему, адже пластики у природному середовищі розкладаються дуже довго.

Окремо слід врахувати, що пластикові пляшки для транспортування та зберігання не потрібно поміщати в ящики чи гофроконтейнери, а достатньо покрити міцною поліетиленовою плівкою. Також для пластикових пляшок набагато дешевше та простіше розробляти нові варіанти форми та дизайну. Ще однією перевагою виробництва пластикових пляшок є простота реалізації їх виробництва на тому самому підприємстві, де ці напої виготовляються. Це дозволяє до 20% зменшити собівартість виробництва, а також забезпечити можливість використання на мобільних установках.

У той же час ПЕТ-пляшки дешевші, ніж інші види упаковки, в середньому на 10-20 % і, як і раніше, залишаються найпоширенішими серед пластикових пляшок. У зв'язку з цим застосування ПЕТ дозволяє забезпечити виробництво тари високої якості, що має гарні експлуатаційні показники та переваги в порівнянні з тарою з інших матеріалів [1].

Сьогодні для виробництва пластикових ємностей для розливу рідин використовується багато різних методів. Найбільш ефективним є інжекційно-видувний метод, технологічна схема якого показана на рисунку 1.

Інжекційно-видувний метод – двоступінчастий процес, що включає виготовлення заготовки (преформи) методом лиття під тиском з подальшим її роздуванням в розм'якшеному стані стисненим повітрям. Розрізняють одностадійний процес, при якому роздування преформ відбувається відразу після їх формування, і двостадійний процес, при якому преформи транспортують на інші підприємства, потім попередньо нагрівають і також роздувають стисненим повітрям. Перевагою інжекційно-видувного методу є більш висока міцність та кращі бар'єрні властивості готових виробів.



**Рисунок 1 – Інжекційно-видувний метод формування тари:**  
**а – закриття форми; б – запечатування гiрла; в – розтягування штоком;**  
**г – видув; д – розкриття форми**

Перевагами, що забезпечуються двостадійною схемою, є наступні:

- 1) преформа займає приблизно в 12 разів менше місця, ніж готова пляшка при транспортуванні;
- 2) одна й та сама преформа може бути використана для виробництва різних пляшок;
- 3) продуктивність видувного автомата при двостадійній схемі є вищою, оскільки не обмежується продуктивністю ливарної машини, що є набагато меншою;
- 4) немає необхідності контролювати якість сировини;
- 5) потрібні менші виробничі площі;
- 6) можливість заздалегідь створити запас готових преформ у місці виготовлення кінцевих виробів.

Таким чином, двостадійна схема просто реалізується на тому самому підприємстві, де виробляються та розливаються напої. У зв'язку з цим у представленому дослідженні було вибрано двостадійну схему виробництва [1].

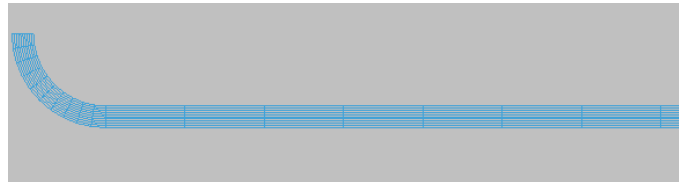
За такого підходу виробництво кінцевого виробу на підприємстві з розливу напоїв складається з наступних стадій:

- 1) завантаження преформ із бункера, орієнтування, захоплення, автоматичний контроль придатності, подача на механізм вузла нагріву;
- 2) розігрівання до заданої температури при проході преформи через піч нагріву, при цьому рівномірність прогрівання преформи забезпечується обертальним рухом заготовок навколо своєї осі;
- 3) остаточний видув та витягування.

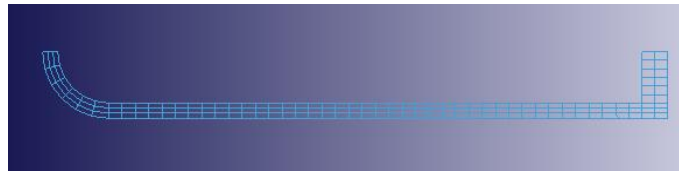
Найефективнішим буде виробництво ПЕТ-пляшок із універсальних преформ із стандартом горла PCO [1].

Задачу моделювання процесу видуву ПЕТ-пляшки було сформульовано у тривимірній постановці, але у зв'язку з осьовою симетрією технологічних елементів та термомеханічних процесів задачу у роботі було вирішено у осісиметричній постановці, що дозволяє більш ефективно використовувати обчислювальні ресурси та прискорити процес обчислювань. У математичному формулюванні моделі використовуються три фундаментальні закони, які є справедливими як для формовочного матеріалу, так і для повітря [2] – закон збереження маси, закон збереження кількості руху (імпульсу) та закон збереження енергії. Модель було створено у системі LS-DYNA [3]. Точність та коректність отриманих результатів суттєво залежить від вибору сітки. У першому випадку (рисунок 2) сітка була підіб-

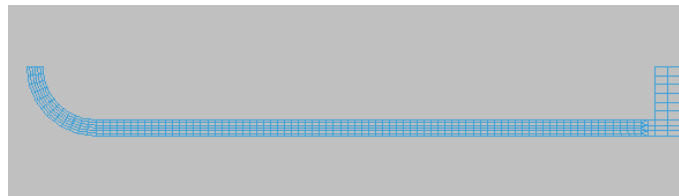
рана невдало, оскільки елементи були занадто видовжені. Друга модель (рисунок 3) є більш придатною, оскільки її елементи наближаються до вигляду квадрату. Третя модель (рисунок 4) є найбільш придатною, оскільки її елементи наближаються до вигляду квадрату та при цьому зменшуються. Використання некоректного типу сітки при моделюванні призводить до помилки у побудові розподілу напружень та деформацій – при видуві швидко утворюється шийка розриву у верхній частині ПЕТ-бутлі, вона «лопається», чого на практиці зазвичай не відбувається.



**Рисунок 2 – Перша модель сітки**



**Рисунок 3 – Друга модель сітки**



**Рисунок 4 – Третя модель сітки**

Таким чином, у представленій роботі за результатами аналізу технологічної схеми видуву ПЕТ-бутлі визначено характеристики технологічного процесу для використання на мобільних установках підприємств з виготовлення та розливу напоїв. Зокрема, визначено, що найефективнішим буде виробництво ПЕТ-пляшок із універсальних преформ із стандартом горла PCO з використанням інжекційно-видувного методу.

Удосконалено чисельну модель фізико-механічних властивостей ПЕТ-бутлі у технологічному процесі видуву з використанням пакету LS-DYNA. За результатами моделювання було визначено, що найбільш ефективним є довільний Лагранжево-Ейлеровий метод (ALE) з використанням сітки, елементи якої наближаються до вигляду квадрату та при цьому зменшуються.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сучасні тренди в розробці дизайну тари в ПЕТ [електронний ресурс]. URL: <https://pet-eu.com/uk/zahodi/suchasni-trendi-v-rozrobtzi-dizajnu-tari-v-pet/>
2. Groot, J. A. W. M. Numerical shape optimisation in blow moulding. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2011. DOI: 10.6100/IR709254
3. LS-DYNA theory manual. Livermore Software Technology Corporation, 2014.