

Міністерство освіти і науки України
Національний університет харчових технологій

**НАУКОВІ ПРАЦІ
НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ**

№ 11

Київ НУХТ 2002

О.О. Сандул
Є.В. Штефан, В.І. Теличкун,
кандидати техн. наук

РОЗРОБЛЕННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПШЕНИЧНОГО ДРІЖДЖОВОГО ТІСТА ЕКСТРУЗІЄЮ

Все більшого поширення у харчовій промисловості нашої країни набувають екструзійні технології. Поширені вони, зокрема, у кондитерській галузі, макаронному виробництві. Останнім часом екструзію починають також застосовувати при виготовленні хлібобулочних виробів. Роботи, спрямовані на розроблення нових сортів продукції екструзією, проводяться і в УДУХТ. Причому, окрім дослідів на фізичних моделях, натурних експериментів, все ширше за-

стосовуються інформаційні технології проектування (ІТТ) [3]. Використання їх дає можливість розраховувати різноманітні конструктивні варіанти обладнання і досліджувати поведінку сировини з найрізноманітнішими структурно-механічними характеристиками. Зокрема, ми розробляємо математичну модель процесу виготовлення екструзією хлібних виробів з пшеничного дріжджового тіста. Вона включає в себе формулювання задачі, аналітичну, алгоритмічну та числову моделі. Пшеничне дріжджове тісто з реологічного погляду розглядається як пружно-в'язко-пластичне тіло.

© О.О. Сандул, Є.В. Штефан, В.І. Теличкун, 2002

Аналитична модель процесу екструзії — це замкнена система рівнянь, яка описує поведінку тіста, що екструдуються, у реальних просторово-часових умовах. Вона побудована на загальновідомих законах збереження маси, кількості руху, рівняннях нерозривності і базується на основах фізико-хімічної механіки [1]. Проте через значні математичні труднощі її практичне використання обмежене, оскільки більшість технологічних задач, у тому числі формування екструзією пшеничного тіста, є нелінійними і нестационарними. Для розв'язування таких задач пропонується використовувати проекційно-сіткові процедури у формі методу скінченних елементів (МСЕ), з допомогою якого процес деформування дискретизується за просторовими змінними, і методу скінченних різниць (МСР) — за часовим аргументом.

При використанні цих методів виникає потреба у створенні нестандартних процедур, призначених для врахування суттєвих конструктивно-технологічних особливостей процесу. Однією з них є наявність тертя, зумовленого контактною взаємодією між поверхнею обладнання та сировиною, що деформується. В нашому випадку це пара "екструдер—тісто". Існування тертя характерне для багатьох стадій оброблення тіста. На деяких з них його можна ігнорувати, на інших воно значно впливає на якість готової продукції. При екструдуванні тіста тертя спричиняє негативні наслідки: збільшуються нормальні напруження на контактній поверхні, спостерігається нерівномірність швидкостей випресовування. Тобто при дослідженні процесу формування екструзією пшеничного дріжджового тіста треба враховувати умови контактної взаємодії пари "продукт—екструдер". Традиційно при моделюванні процесів харчової промисловості сили тертя не враховувалися: припускалося повне проковзування тіста або існування повністю прилипливого шару. Жоден з цих двох випадків не відповідає реальному технологічному процесу, тому розроблення алгоритму і програми, що враховують сили тертя, дає можливість зробити модель більш адекватною.

Докладно основні положення щодо врахування сил тертя при створенні математичної моделі процесу формування екструзією пшеничного вибродженого тіста наведені в праці [2].

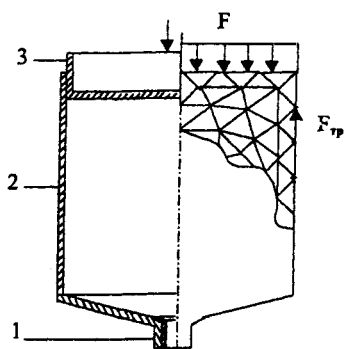


Рис. 1. Конструктивна схема екструдера та скінченноелементна модель процесу формування екструзією вибродженого пшеничного тіста:
1 — формувальна матриця; 2 — корпус екструдера; 3 — пуансон

поверхневі точки накладаються граничні умови змішаного типу, тобто у них можуть бути задані кінематичні обмеження по нормалі до поверхні, а також вузлові сили, задані по нормалі або по дотичній до поверхні (сили тертя).

Трикутні елементи, які являють собою в даному окремому випадку певні об'єми тіста, під дією зовнішнього навантаження рухаються, переміщуються з поверхні на поверхню і виходять за межі екструдера. Це зумовлює необхідність при заданні граничних умов передбачити процедуру змінення їх для рухомої скінченноелементної

моделі відповідно до кінематичних особливостей поведінки тістової маси.

Щоб розробити числову модель для реалізації процедури перевизначення граничних умов, запропоновано оригінальний алгоритм, який передбачає переформування масивів, що містять інформацію про вузли з відповідними їм граничними умовами.

Змінювати граничні умови треба у двох випадках.

1. Вузол не вийшов за межі екструдера, але перейшов на іншу поверхню, яка характеризується відповідними їй граничними умовами і, можливо, іншим коефіцієнтом тертя. Алгоритм змінення граничних умов у цьому випадку складається з визначення номерів вузлів, які були на кожній з поверхонь до початку навантаження, та граничних умов, які їм відповідали. При досягненні вузлом внаслідок руху іншої поверхні (це визначається поточними координатами вузла) йому присвоюються нові граничні умови, характерні для цієї іншої поверхні.

2. Вузол вийшов за межі екструдера. Зміна граничних умов у цьому випадку особливо важлива для дослідження на математичній моделі процесу екструзії дріжджового тіста, адже для нього характерний високий вміст вуглекислого газу, накопиченого під час бродіння. Перебуваючи в екструдері, тісто зазнає дії стискувальних напружень, внаслідок чого CO_2 частково розчиняється у рідкій фазі тіста і поглинається білковим остовом. При виході за межі екструдера відбувається різке падіння тиску, внаслідок чого починає виділятися розчинений вуглекислий газ, що призводить до відчутного збільшення поперечних розмірів екструдату по відношенню до діаметра матриці. Щоб адекватно відобразити цей процес розбухання, із вузлів, що вийшли за межі екструдера, граничні умови треба взагалі знімати, оскільки будь-яких кінематичних обмежень чи зовнішніх сил на цьому етапі формування вже немає. Алгоритм змінення граничних умов у цьому випадку передбачає:

перевірку умови перебування вузла в межах екструдера;

виключення вузла з усіх масивів, які містять інформацію про граничні умови, якщо координати вузла менші від зафіксованих порогових значень.

Цей алгоритм реалізований у вигляді спеціалізованих програмних модулів, які адаптовані для базової програмної системи PLAST [4]. На основі цієї програми проведено чисельні експерименти з дослідження процесу формування екструзією вибродженого тіста з параметрами: вологість $W = 42\%$, динамічний коефіцієнт в'язкості $\mu = 419 \text{ Па}\cdot\text{с}$, модуль пружності $E = 277500 \text{ Па}$, граничне напруження зсуву $\tau = 568 \text{ Па}$. Геометрія екструдера показана на рис. 1.

Згідно з планом чисельних експериментів проведено кілька варіантів розрахунків, мета яких — оцінити вплив конструктивно-технологічних особливостей на силові характеристики процесу екструзії. Варіанти розрахунків:

- 1) без урахування сил тертя та без зміни граничних умов;
 - 2) з урахуванням сил тертя, без зміни граничних умов;
 - 3) з урахуванням сил тертя, зі зміною граничних умов.
- Результати чисельного моделювання показані на рис. 2.

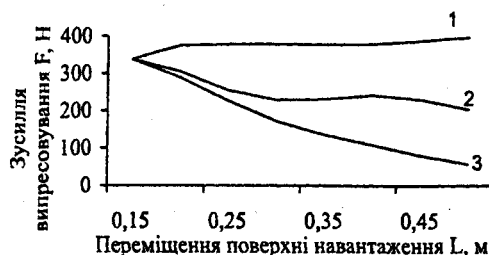


Рис. 2. Залежність зусилля випресовування від переміщення поверхні навантаження:
1—3 — варіанти розрахунків

Як видно з рис. 2, у кінці процесу формування ($L = 0,5$ м) значення зусилля випресовування F варіантів розрахунку 1 і 3 значно (на 85,1 %) відрізняються одне від одного. З урахуванням сил тертя та із зміною граничних умов під час руху тіста точність математичних розрахунків збільшується.

Висновки. Аналітичні моделі, які теоретично описують процеси деформування реальних тіл, є фізично та геометрично нелінійними. Через значні математичні труднощі практичне використання їх обмежене. Тому пропонується використовувати методи чисельного моделювання, зокрема МСЕ та МСР.

Показано, що при моделюванні процесів, які відбуваються в машинах та апаратах складної геометричної конфігурації, слід передбачити процедуру змінення граничних умов для рухомої скінченноелементної моделі.

При створенні математичних моделей технологічних процесів, в яких сили тертя помітно впливають на якість готової продукції, умови контактної взаємодії не можна ігнорувати. Деяке ускладнення моделі у разі їх урахування компенсується кращою відповідністю розрахункових та експериментальних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Абрамов В.И., Штефан Е.В., Крищук М.Г.* Математическое моделирование процессов мундштучного

прессования керамических масс // Обработка дисперсных материалов и сред. — Одесса: НПО "Вотум", 1999. Вып. 9.

2. Сандул О.О., Штефан Є.В., Теличкун К. Теличкун В.І. Розроблення методики дослідження і тактної взаємодії "продукт—екструдер" в процесах і сушіння тіста // Шоста Міжнар. наук.-техн. конф. "Г. блеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в лугах харчової і переробної промисловості": Тези доп. К.: УДУХТ, 2000.

3. Штефан Є.В. Розробка інформаційних технологій проектування (ГП) машин та апаратів харчових виробництв // Міжнар. наук.-техн. конф. "Розроблення та впровадження прогресивних ресурсоощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість": Тези доп. — К.: УДУХТ, 1997.

4. Штефан Є.В., Гайдуків В.В., Зеленюк О.Є. Розробка універсальної обчислювальної системи для розрахунку процесів та апаратів харчової промисловості // Міжнар. наук.-техн. конф. "Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну галузь АПК": Тези доп. — К.: КТІХП, 1993.

Надійшла до редколегії 14.09.2000 р.