

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ГАЗОВОЇ ФАЗИ ТІСТА

О ЧЕПЕЛЮК,
кандидат технічних наук
О ГУБЕНЯ,
асистент
Національний університет харчових технологій



ПАЗВАНУ проблему важливо враховувати й при дослідженні екструзування вибродженого тіста, що дасть змогу визначити інтервал тиску, в межах якого варто формувати джгути, а також дослідити розподіл і розрахувати відсотковий вміст газової фази в тісті й представити залежність її вмісту від прикладеного навантаження.

При моделюванні таких проблем хлібопекарської галузі, як транспортування тістових напівфабрикатів по трубопроводах, рух у формувальних каналах, властивість тіста змінювати об'єм під дією зовнішнього навантаження та зміна співвідношення між газовою і твердо-рідкою фазами тіста здебільшого не враховувалися. Таке спрощення розрахунків призводило до появи значних похибок, бо не відображало реальних процесів, характерних для виробництва.

Газова фаза дріжджового тіста формується як завдяки повітрю, що потрапляє ще до початку замішування з борошном та водою, а також під час замішування, так і завдяки газоподібним продуктам, що утворюються під час спиртового бродіння.

В ПРОЦЕСІ ЕКСТРУЗІЇ ДАЄ ЗМОГУ ЕКОНОМИТИ ЧАС І МАТЕРІАЛЬНІ РЕСУРСИ ПІД ЧАС РОЗРАХУНКІВ ВАРІАНТІВ ОБЛАДНАННЯ

Газоподібні продукти розчиняються у воді, адсорбуються на поверхнях молекул гідрофільних полімерів, а їх надлишок в тісті призводить до виникнення бульбашок газу, стінки яких утворені поверхнево активними речовинами (рис. 1).

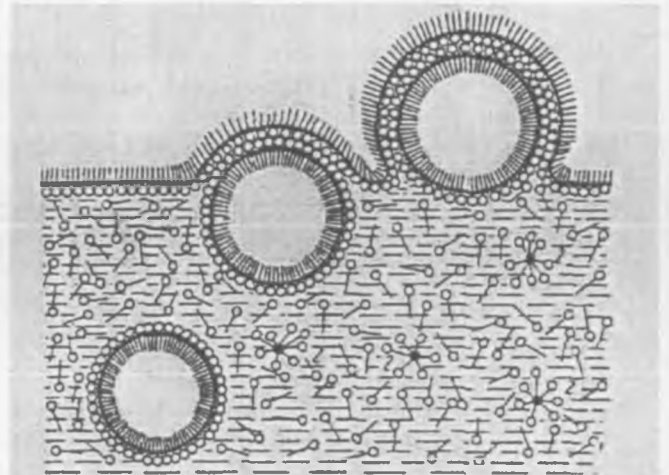


Рис. 1. Схема утворення піноподібної структури тіста, що бродить: 0 — молекули ПАР; 1 — бульбашки газової фази; 2 — вірогідні центри їх утворення

Збільшення об'єму бульбашок пов'язано з дифузиею CO_2 крізь стінки пор у напрямку від більшого надлишкового тиску, характерного для бульбашок малих розмірів, до меншого, в результаті чого він вирівнюється. Щоб бульбашка почала збільшуватися в розмірах, різниця тисків всередині та ззовні має перевищувати руйнівні ефекти поверхневого натягу та сил в'язкості, тобто

$$\Delta P > \frac{2\sigma}{R_k} + 4\eta \frac{R}{R_k}$$

де ΔP — різниця тисків всередині та ззовні бульбашки, Па; σ — поверхневий натяг, Н/м; R_k — критичний радіус бульбашки, м; $R=(dR/dt)$ — швидкість зміни радіусу бульбашки з часом, м/с; η — в'язкість тіста, Па·с.

На тиск газу всередині бульбашки більше впливає поверхневий натяг. Зокрема, для відносного

вмісту газу в тісті 40% тиск всередині бульбашки завдяки в'язкому опору становить $1,4 \cdot 10^2$ Па, а поверхневому натягу — $1,3 \cdot 10^3$ Па.

Бульбашка вуглекислого газу, що утворилася під час бродіння, зазнає дії двох сил: розтягуючої — $F_{\text{розт}}$ і стискаючої — $F_{\text{см}}$. За умови $F_{\text{розт}} < F_{\text{см}}$ вуглекислий газ розчиняється, причому інтенсивніше з підвищенням зовнішнього тиску.

При виготовленні хлібних виробів екструзією особливе значення має поведінка газової фази, оскільки саме вона значною мірою впливає на стан поверхні та якість готової продукції. За зовнішнього тиску тісто рухається в напрямку формувального елемента екструдера. При цьому бульбашки газу розчиняються в тісті, а об'ємний вміст газової фази тіста однакової рецептури залежить не тільки від зовнішнього тиску, а й від температури матеріалу. Оскільки температура тіста не змінюється під час екструдювання, то концентрація CO_2 в тісті однозначно залежатиме від тиску.

На виході з формуючого отвору тісто має можливість набрати форми, яка відповідає рівноважному стану. На цьому етапі внаслідок перепаду тисків значно збільшуються кількість і розміри газових бульбашок, формується структура пористості і об'єм заготовки.

Збільшення діаметра екструдату порівняно з формувальним каналом називають ефектом розбухання, пов'язаний він із зміною співвідношення між газовою і твердо-рідкою фазами тіста.

Процес розробки і впровадження надійного й економічного технологічного обладнання, в тому числі машин і апаратів для пластичної обробки й формування тістових мас, значно прискорює й здешевлює використання сучасних інформаційних технологій проектування і математичного моделювання. Його було використано і в даному випадку для дослідження екструдювання вибродженого тіста. При цьому з метою врахування істотних конструктивно-технологічних особливостей екструзії, зокрема, сил тертя, поведінки газової фази під час екструдювання та зміни реологічних властивостей тіста під впливом зовнішнього навантаження, було вдосконалено існуючу модель деформування пружнов'язкопластичних середовищ. **Для розв'язання цього нелінійного й нестационарного завдання використано проекційно-сіткові процедури у формі методу скінченних елементів.**

Модель переходу газової фази з газоподібного стану в розчинений і навпаки побудовано на залежності її поведінки від тиску в середовищі, що відображається на зміні коефіцієнта абсорбції K . Він показує, який об'єм газу розчиняється в одиниці об'єму

рідини: $K = \frac{V_{\text{газу}}}{V_{\text{рід}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$. Оскільки при ізотермічному

процесі коефіцієнт абсорбції залежить тільки від тиску, і врахувавши, що вода не стискується, маємо:

$$\frac{dK}{dP} = \frac{dV_{\text{газу}}}{dP} \cdot \frac{1}{V_{\text{рід}}}, \text{ або в прирощеннях}$$

$$\Delta K = \Delta V_{\text{газу}} / V_{\text{рід}}. \quad (1)$$

Вихідні дані для створення моделі переходу газової фази з одного стану в інший: номер кроку навантаження, геометрія скінченного елемента (певного об'єму тіста), значення тиску P , пористість θ і залежність коефіцієнта абсорбції вуглекислого газу K від тиску.

Окремий скінченний елемент при розрахунку вісесиметричних задач є тором з трикутним перерізом.

Кінцеві параметри розрахунку — зміна гідростатичного тиску й пористість — визначають для всіх цих тороподібних скінченних елементів. На кожному кроці навантаження значення вказаних величин розраховують для трьох станів матеріалу — початкового (1), поточного (2) й кінцевого (3). Параметри кінцевого стану на поточному кроці навантаження є початковими для наступного.

До початку роботи алгоритму обчислюємо загальну для твердо-рідкої й газової фаз масу $m_{\text{заг}}$ кожного тороподібного елемента, що залишається сталою протягом усього процесу навантаження, та об'єм рідини $V_{\text{рід}}$, який поглинає вуглекислий газ, що виділився при бродінні.

Загальний об'єм $V_{\text{газ}}$, який займає тороподібний елемент з трикутним перерізом до початку навантаження, розраховуємо згідно з другою теоремою Гульдена: $V_{\text{газ}} = 2\pi R \cdot S_{\Delta}$.

На першому кроці навантаження об'єм газової фази обчислюємо з урахуванням початкової пористості θ :

$$V_{\text{газ1}} = V_{\text{газ}} \cdot \theta.$$

Початковий тиск в елементі та коефіцієнт абсорбції для цього кроку дорівнюють нулю: $P_1 = 0$ і $K_1 = 0$. Для наступних кроків навантаження загальний об'єм кожного трикутного елемента змінюватиметься, тому позначимо його V і розраховуватимемо за тією ж теоремою Гульдена, але для нових площі перерізу тороподібного елемента S_{Δ} і відстані до центра тяжіння R .

Поточний об'єм газової фази визначаємо як частку від загального об'єму за допомогою поточної пористості θ_2 , обчисленої для даного кроку навантаження:

$$V_{\text{газ2}} = V_{\text{газ}} \cdot \theta_2.$$

Методом лінійної інтерполяції розраховуємо коефіцієнт абсорбції за поточного тиску P_2 й визначаємо різницю коефіцієнтів абсорбції:

$$\Delta K = K_2 - K_1.$$

Зміна об'єму газової фази з урахуванням (1)

$$\Delta V_{\text{газ}} = \Delta K \cdot V_{\text{рід}},$$

тоді значення кінцевого об'єму газової фази, не розчиненої в рідині:

$$V_{\text{газ3}} = V_{\text{газ2}} + \Delta V_{\text{газ}}.$$

Якщо коефіцієнт абсорбції зріс (що відповідає зростанню тиску), то більша кількість газу розчинилася в рідкій фазі тіста, а отже, об'єм вільної газової фази зменшився. Знайшовши кінцевий об'єм газової фази $V_{\text{газ3}}$, можна перерахувати пористість на да-

ному кроці навантаження:

$$\theta_3 = V_{\text{газ}}/V.$$

Будь-яка математична модель містить у собі певні припущення, спрощення. У даному випадку вуглекислий газ розглядаємо як ідеальний, для якого при ізотермічному процесі справедливе співвідношення $PV = \text{const}$. З урахуванням цього новому значенню об'єму газу відповідатиме нове значення тиску (кінцеве):

$$P_3 = \frac{P_2 \cdot V_{\text{мл}}}{V_{\text{мл}}}$$

На виході з формувального каналу надлишковий тиск падає до 0, і газові бульбашки повинні швидко збільшуватися в об'ємі. Це відбувається як внаслідок перепаду тисків, так і особливостей структурної сітки матеріалу.

Основне завдання даного алгоритму — обчислення зміни тиску $\Delta P = P_3 - P_1$, який дає змогу визначити прирощення напруження $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = \Delta\sigma_z = \Delta P/3$ у трьох напрямках і на їх основі розрахувати фіктивні сили, які мають забезпечити відповідну зміну розмірів екструдату.

За допомогою даної математичної моделі одержали залежність коефіцієнта розбухання сформованого виробу від зовнішнього навантаження P_n (рис.2).

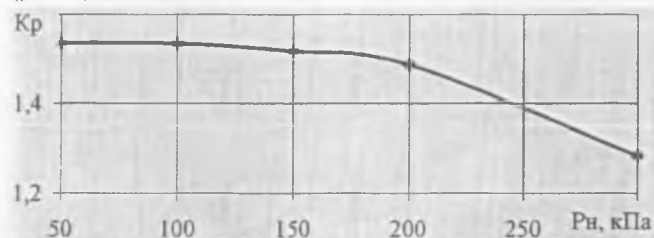


Рис.2. Залежність коефіцієнта розбухання K_p екструдата від зовнішнього тиску

Аналіз явища розбухання екструдату свідчить: із збільшенням величини зовнішнього тиску зменшується діаметр випресованої заготовки. Така закономірність пояснюється інтенсивнішим виділенням CO_2 на виході з формуючого каналу внаслідок більшого перепаду тисків. Якщо при 50–100 кПа виріб розширюється порівняно повільно, то при більших значеннях тиску CO_2 миттєво переходить з розчиненого в газоподібний стан, у результаті чого значна його частина видаляється в навколишнє середовище. Структурна сітка тіста руйнується, свідченням чого є поверхня екструдату, вкрита кратерами різних розмірів. Таким чином, як недостатній, так і занадто великий перепад тисків на виході з формуючого каналу призводить до зменшення діаметра випресованого екструдату. Тому **необхідні подальші дослідження щодо визначення оптимальної величини тиску в каналі, за якого забезпечується максимальне спучування виробу й зберігається його якісна поверхня**

Отже, зважаючи на те, що поведінка газової фази тіста під час формування екструзією — заключній стадії процесу формування тістових заготовок — визначає структуру й пористість готових виробів, ігнорувати газову фазу при створенні математичної моделі процесу неприпустимо.

Реалізація процедури зміни станів газової фази залежно від зовнішнього навантаження допомогла створити математичну модель процесу екструзії вібродженого тіста. Вона є інструментом, що дає змогу з мінімальними витратами часу й матеріальних ресурсів розраховувати конструктивні варіанти обладнання й досліджувати поведінку сировини з найрізноманітнішими структурно-механічними характеристиками.