

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ У НЕРІВНОВАЖНИХ ПРОЦЕСАХ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Розгляд проблеми інтенсифікації та оптимізації ефективності технологій харчових виробництв неможливий без встановлення основних закономірностей термомеханічних і масообмінних процесів, що проходять у харчовій масі. Більшість харчових мас є висококонцентрова-

ними гетерогенними дисперсними системами, які доцільно вважати об'єктами фізико-хімічної механіки. Як відомо, технологічна переробка харчових мас супроводжується одночасним проходженням реологічних, хімічних, температурних, масообмінних процесів. Тобто для модельного описування подібних процесів потрібно сформулювати відповідні нелінійні просторово-нестационарні крайові

задачі математичної фізики. Однак отримання аналітичних розв'язків цих задач пов'язане зі значними математичними труднощами.

Завдяки появі ЕОМ великої потужності з'явилася можливість ефективного розрахунку нелінійних просторово-нестационарних крайових задач математичної фізики та отримання відповідних кількісних характеристик, які відображають поведінку об'єктів, що розглядаються, у різних технологічних процесах. При цьому головним принципом проведення обчислювального експерименту є розгляд у єдиному комплексі постановки задачі, методів її розв'язування та реалізації розрахункового алгоритму у вигляді програмної системи. Цей принцип покладено в основу при створенні інформаційних технологій проектування (ІТП) процесів та апаратів харчових виробництв [1].

Розглянемо ІТП типу "математична модель — інтелектуальна експертна система — система автоматизованого проектування", схему якої наведено на *рис. 1*. Інформаційна технологія проектування розглядає технологічний процес у вигляді мультикомпонентної системи взаємозв'язаних об'єктів досліджень: харчової маси, елементів технологічного обладнання, термомеханічного навантаження та ін. Розроблено загальну методику визначення відповідних раціональних конструктивно-технологічних параметрів, схему якої наведено на *рис. 2*.

Розглядаючи конкретну переробну технологію, приймаємо концепцію подання харчових мас як двофазних сумішей пористої або зернистої твердої деформованої структури з рідиною чи газом. Для описування поведінки харчової маси використано поняття напружень, деформацій, щільності, а також швидкості зміни цих параметрів. Ці тензорні та скалярні характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми і поверхні) стягуються до точок. У традиційних

моделях континууму точки отождоюють з частками середовища, а ті, у свою чергу, є елементарними носіями властивостей матеріалу. Подібне отождоювання в харчовій масі ускладнюється через брак єдиної думки про те, що потрібно розуміти під часткою такого середовища. Класичне уявлення про частку в механіці дисперсних середовищ полягає в отождоюванні її з твердими мінеральними зернами різної дисперсності. Виникає такий парадокс: кожна частка середовища — це по суті тверде тіло, що деформується. Оскільки кожна дискретна частка взаємодіє із сусідніми, розподіл напружень у ній неоднорідний. Тому, щоб спростити математичне описування механічної поведінки харчових мас, будемо використовувати для відповідних параметрів просторове усереднення по твердій та рідкій фазах.

В основу аналітичної моделі покладено рівняння збереження кількості руху в макрокоординатах для:

а) твердої фази

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 u) + \text{grad}(\alpha_1 \rho_1 u \times u) - \text{grad}(\alpha_1 \sigma) - F_1 - F^{(1)} = 0; \quad (1)$$

б) газорідкої фази

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2 v) + \text{grad}(\alpha_2 \rho_2 v \times v) - \text{grad}(\alpha_2 P) - F_2 + F^{(2)} = 0, \quad (2)$$

де α_1, α_2 — об'ємні вмісти відповідно твердої та газорідкої фаз; ρ_1, ρ_2 — відповідні середні густини фаз; u, v — вектори середньої швидкості зміщення відповідно твердих часток і рідини; P — гідростатичний тиск у газорідкій фазі; F_1, F_2 — вектори об'ємних сил відповідно у твердій і рідкій фазах; σ — тензор напружень у твердій фазі; $F^{(1)}, F^{(2)}$ — сили міжфазної взаємодії.

Внаслідок рівності $P_n = -\sigma_{nn}$ в точках внутрішніх поверхонь поділу газорідкої і твердої фаз (n — вектор нормалі до поверхні розділу) виконується умова

$$P^{(2)} = P^{(1)} = P^0. \quad (3)$$

Формальне складання рівнянь (1) і (2) описує, очевидно, збереження кількості руху у всіх макроточках дисперсного середовища:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 u + \alpha_2 \rho_2 v) + \text{grad}(\alpha_1 \rho_1 u \times u + \alpha_2 \rho_2 v \times v) - \text{grad}(\alpha_1 \sigma + \alpha_2 P) - \alpha_2 \mu \nabla^2 v - F_1 - F_2 = 0. \quad (4)$$

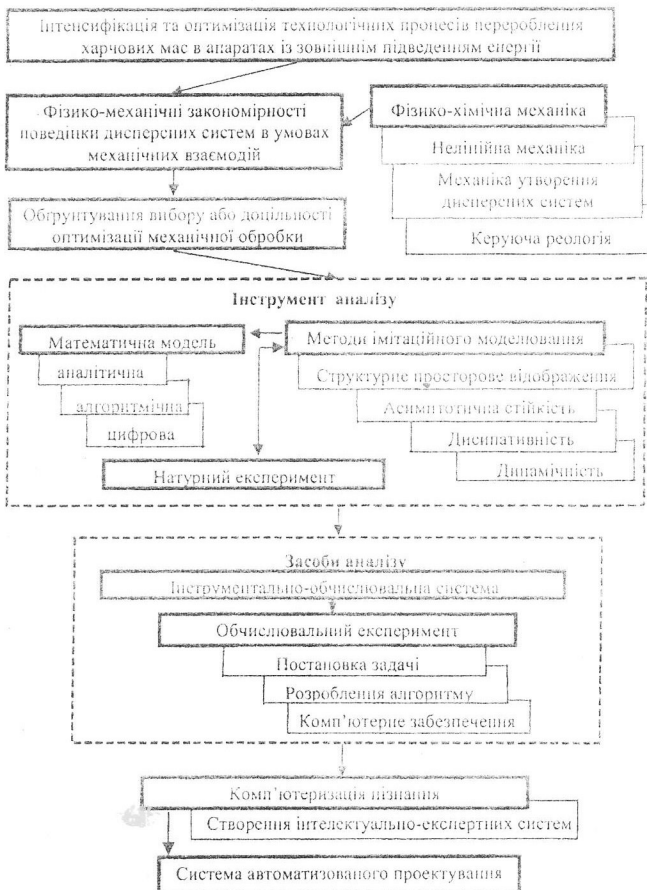


Рис. 1

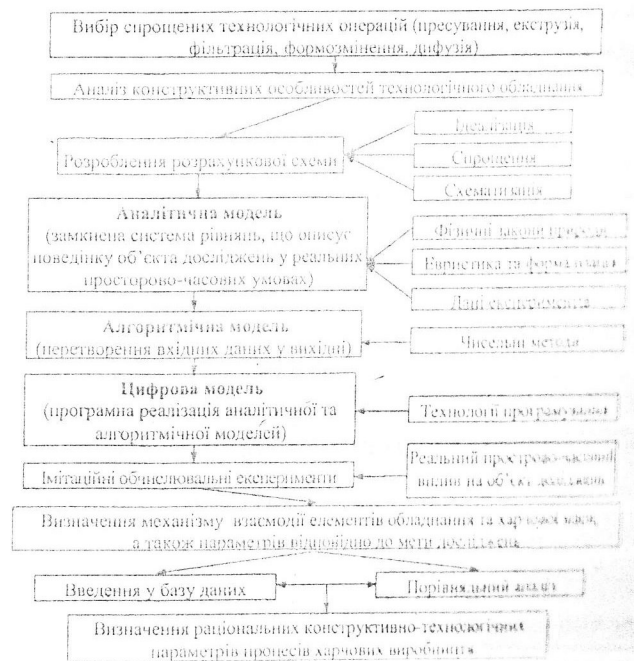


Рис. 2

Однак у практичних розрахунках зручніше розглядати балансі рівняння кількості руху окремо — у формі рівнянь відносного руху газорідкої і твердої фаз.

Якщо задати силу міжфазної взаємодії у формі $F^0 = F^{(1)} = F^{(2)} = R + P \text{grad} \alpha_2$ (5)

врахувати, що $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$, то рівняння відносного руху твердої фази набуде вигляду

$$\alpha_1 \left(\rho_1 \frac{du}{dt} - \rho_2 \frac{dv}{dt} \right) - \text{grad} \sigma^f - \frac{R}{\alpha_2} - \alpha_1 (\rho_1 - \rho_2) G = 0, \quad (6)$$

де $R = \frac{\mu}{a} \alpha_1 \alpha_2 (v - u)$ — ефективна сила в'язкого опору; μ — коефіцієнт в'язкості рідкої фази; a — коефіцієнт міжфазного тертя.

Рівняння відносного руху рідкої фази можна зобразити у формі

$$\rho_2 \frac{dv}{dt} = -\text{grad} P - \frac{R}{\alpha_2} + \rho_2 G, \quad (7)$$

де G — вектор прискорення вільного падіння.

Зазначимо, що для процесів, які проходять повільно (немає інерційних ефектів: $\rho_2 \frac{dv}{dt} = 0$; $\rho_2 G = 0$), рівняння (7) відображає закон фільтрації в ізотропному пористому середовищі:

$$v - u = -\frac{a^2}{\mu \alpha_1} \text{grad} P. \quad (8)$$

Як показують експериментальні дослідження, при великих градієнтах тиску або швидкостях фільтрації виконується лінійний закон Дарсі:

$$v - u = -\frac{k^p}{\alpha_1} \text{grad} P, \quad (9)$$

де k^p — коефіцієнт проникності середовища.

Щоб замкнути отриману систему рівнянь (1)–(9), треба сформулювати режим деформування твердої фази (визначальні співвідношення) та відповідні режими просторово-часової зміни граничних умов. Визначальні співвідношення приймаємо в рамках реологічної моделі пружно-в'язко-пластичного тіла. При цьому деформування рідкої фази враховуємо заданням кінетики зміни об'ємних часток фаз, зумовлених фільтраційним механізмом (7).

Структурно-механічні параметри дисперсного середовища визначаються на основі експериментально-аналітичної методики, яка описана в праці [2].

Алгоритмічна модель складається з таких основних частин:

розв'язок сформульованої задачі оснований на принципі розкриття проекційно-сітковими методами: кінцевих елементів за просторовими змінними та кінцевих різниць за часовим аргументом;

обчислювальні алгоритми, які реалізують найтисливіші реологічні процеси харчових технологій: пресування, екструзії, ітхамування, формозміни та масопереносу пружно-в'язко-пластичних харчових мас.

Розроблені алгоритми реалізовані у вигляді програмного обчислювального комплексу PLAST-002 (цифрова модель) [3]. Використання сучасної 32-розрядної архітектури в середовищі WINDOWS дає можливість виконувати розрахунки практично необмеженої складності — потужність задач, що розв'язуються, змінюється в широких межах і досягає десятків тисяч вузлів. Програмний комплекс призначено для моделювання нерівноважних процесів деформування дисперсних двофазних структур при відомому законі навантаження в режимі пружно-в'язко-пластичної поведінки твердої фази. Схему функціонування програмної системи PLAST-002 зображено на рис. 3.

В межах розробленого методологічного підходу до визначення раціональних конструктивно-технологічних

параметрів реологічних процесів у технологіях харчових виробництв розглянуто три типових процеси.

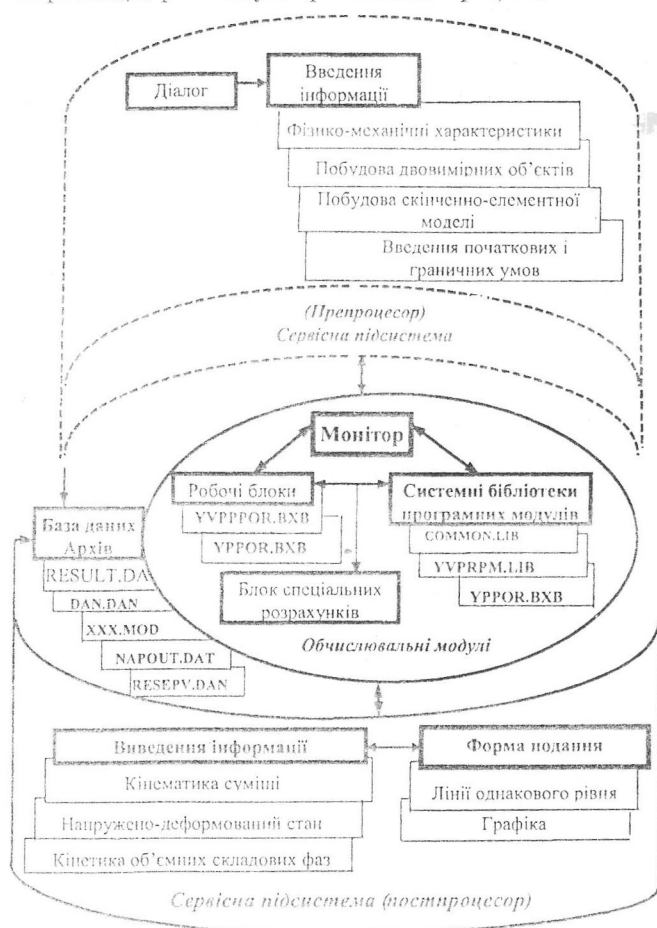


Рис. 3

Пресування бурякової стружки. Щодо дослідження пресо-дифузійної технології видобутку цукру з бурякової стружки розглянуто задачу аналізу впливу конструктивно-технологічних параметрів пресувальних апаратів шнекового типу на кінетику процесів деформування сокостружкової маси і зміну концентрації віджатого соку [4]. Розроблено методику розв'язання цієї задачі. Схему цієї методики показано на рис. 4.

Проведено імітаційні чисельні експерименти з дослідження руху сокостружкової суміші у шнековому пресі. Отримані результати дають змогу визначити вплив па-



Рис. 4

аметрів гвинта шнека (змінення кроку витка, діаметра вала і швидкості його обертання) на характеристики соко-відділення і кінетику тиску в матеріалі, що пресується.

Подрібнення м'яса у м'ясорізальному вовчку. Для дослідження процесу подрібнення м'яса розглянуто задачу аналізу деформування, руху і масопереносу фаршу у м'ясорізальному вовчку. Схему розв'язання задачі зображено на рис. 5.



Рис. 5

За допомогою розробленої математичної моделі розв'язано три взаємопов'язані задачі [5]:

за відомими конструкційними і кінематичними параметрами вовчка визначено технологічні та споживчі характеристики продукту;

за відомими характеристиками готового фаршу дібрано потрібні конструктивно-технологічні параметри вовчка;

визначено конструктивно-технологічні параметри РК вовчка з метою підвищення працездатності їх та надійності.

Перемішування тіста в апаратах безперервної дії. Розглянуто процеси руху місильного органу в масі тіста [6]. Загальну схему моделювання зображено на рис. 6.

Внаслідок проведеного імітаційного моделювання взаємодії лопаток різної геометричної форми визначено параметри примежового шару в об'ємі тіста. На основі отриманих даних визначено дисипаційні характеристики перемішування.

Висновок. Результати проведених досліджень свідчать про високу ефективність запропонованих методологічних розробок у разі використанні їх у проектувальній практиці процесів і апаратів харчових виробництв. Запропонована ІТП дає можливість значно прискорити процеси розроблення і впровадження надійного та економічного технологічного обладнання.

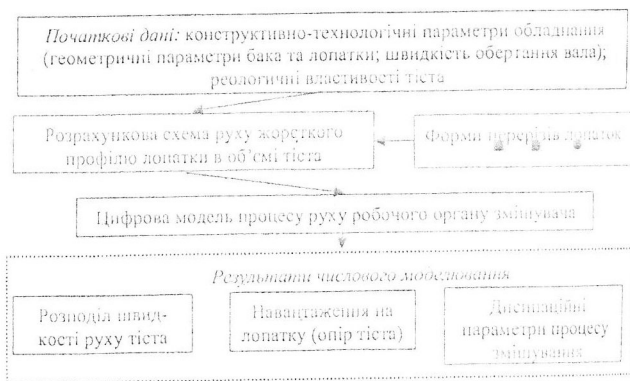


Рис. 6

ЛІТЕРАТУРА

1. Штефан Є.В. Розробка інформаційних технологій проектування 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. — С. 37.
2. Ефективність пресування пивної дробини / В.О. Аністратенко, Є.В. Штефан, О.М. Прохоров, Ю.О. Засць // Міжнар. наук.-техн. конф. "Розроблення та впровадження прогресивних ресурсоощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість". Тези доп. — К.: УДУХТ, 1997. — С. 31.
3. Штефан Є.В., Гайдуков В.В., Зеленюк О.С. 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 галузі АПК". Тези доп. — К.: КТІХП, 1993. — С. 648.
4. Штефан Є.В., Засць Ю.О., Крамар В.Г. Математичне моделювання процесу пресування бурякової стружки // Міжнар. наук.-техн. конф. "Розроблення та впровадження прогресивних ресурсоощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість". Тези доп. — К.: УДУХТ, 1997. — С. 38.
5. Некоз С.А., Пушанко Н.Н., Штефан Є.В., Гейфт Р. Исследование процесса продавливания фарша через отверстия решетки мясорезающего волчка // Конструирование и эксплуатация машин. — Вилосток: Политехника Вилосток, — 1998. — Вып. 5. — С. 238-246.
6. Литовченко І.М., Штефан Є.В. Моделювання кінетики руху робочих органів у хлібному тісті: Тези м. Всеукр. наук.-техн. конф. "Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість". — К.: УДУХТ, 1995. — С. 331.

Надійшла до редакції 14.09.2000 р.