

Выводы

В результате проведенных теоретических исследований установлена взаимосвязь между технологическими параметрами процесса измельчения в мельнице ударно-отражательного действия. Получены экспериментальные данные, подтверждающие математические зависимости для расчета температуры пылегазовой смеси на выходе из мельницы, которые позволяют устанавливать технологические параметры процесса измельчения различных материалов.

Литература

1. Опарин С.А. Процесс и оборудование помола растительных материалов до микронных размеров: дис. ... кандидата технических наук : 05.17.08 / Опарин Сергей Александрович. – Днепропетровск, 2002. – 193с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / Касаткин А.Г. – М.: «Химия», 1971. – 784с.
3. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие / Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. – 10-е изд., перераб. и дополн. Л.: Химия, 1987. – 576с.

УДК 532.135; 532.5

ТЕЧІЯ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ РІДИНИ В ПЛОСКОМУ КАНАЛІ

Білецький Е.В. канд. техн. наук, доцент¹,
Потапов В.О. д-р техн. наук, професор²,
Толчинський Ю.А. канд. техн. наук, доцент,³
Петренко О.В. асистент²
Харківський торгово-економічний інститут КНТЕУ¹,
Харківський державний університет харчування та торгівлі²,
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків³

В статті розглянуто питання математичного моделювання в'язкопластичної течії бінгамовської рідини в прямому каналі черв'ячної машини. Отримані рівняння дозволяють проводити моделювання інших в'язкопластичних течій.

The article deals with the issue of mathematical modeling viscous-plastic Bingham fluid flow channel in a live worm machine. The equations allow for the simulation of other v'yazkoplastychny flows.

Ключові слова: бінгамовські рідини, черв'ячна машина, в'язкопластична течія, прямий канал, математична модель.

Більшість процесів харчової технології присвячено вирішенню проблеми надання нових властивостей харчовим продуктам; а саме, збільшенню термінів зберігання, надання нових смакових і споживчих якостей. Так або інакше, такі процеси, по суті, є механофізичними і (або) механохімічними [1]. Продукти, які зазнають механофізичних і механохімічних перетворень, як правило, мають велику ефективну в'язкість. Саме завдяки наявності великої в'язкості можливо організувати такі рухи харчових продуктів, у яких в об'ємі рухомого середовища виникають значні здвигові напруги. Ці напруги запускають, регулюють темп і рівень механофізичних і механохімічних перетворень в рухомому середовищі. Из-за великої ефективної в'язкості ідеальним засобом організації руху є черв'ячні машини [2, 7]. Відомо велике різноманіття різних черв'ячних машин, що відрізняються внутрішньою конструкцією робочих органів, корпусу, кількістю черв'яків, напрямом обертання валів, конструкцією вихідного пристрою. Зручність застосування черв'ячних машин полягає в здатності регулювання рівня здвигових напруг у рухомому матеріалі в широкому діапазоні, здійснення процесів нагрівання і охолодження матеріалу, і здійснювання цих дій як інтегрально, так і локально, використовуючи робочі органи різної форми та змінюючи напрям штовхаючої здатності цих органів.

Аналіз процесів, які відбуваються в черв'ячних машинах, засновано на положенні про те, що поверхні корпусу машини і її робочих органів формують канали так, що вся робоча камера (зона) машини може бути представлена у вигляді сукупності – послідовності різних каналів [2, 3, 8, 9]. У таких каналах можуть варіюватися як розміри при збереженні подібності самих каналів, так і змінюватися їх форма, без

зміни характерних розмірів або змінюватися і те, і інше. При побудові поля швидкості рухомого в каналі матеріалу, форми і розміри мають визначальну роль, оскільки визначають в значній ступені граничні умови руху. При аналізі руху в робочій камері черв'ячної машини в якості базової, зручно використовувати граничний канал. Розуміння руху в цьому каналі легше отримати, якщо виконати наступну уявну операцію: залишити одну пару паралельних границь, а іншу видалити на нескінченність. Потім зробити те ж саме з іншою парою границь. Два рухи, які при цьому виходять – це рух в плоскому каналі. Якщо потім з'єднати два ці рухи в одне за допомогою деякого алгоритму, то можна отримати модель течії в прямокутному каналі. З описаної процедури виходить, що вивчення руху матеріалу в плоскому каналі є важливим елементом у вивченні більш складних течій. Такий підхід більш виправдовує себе у разі, коли реологія матеріалу відрізняється від ньютонівської. Ступінь впливу неньютоновості і її проявів чітко видно в простих течіях.

У даній роботі, на підставі вище сказаного, розглядається в'язкопластична течія в плоскому каналі з метою отримання на його основі картини течії в прямокутному каналі. Розглядається тільки поздовжня течія під впливом дії різниці тисків на кінцях каналу. Облік поперечної циркуляції в плоскому каналі, зважаючи на відсутність другої пари границь не має сенсу. Поперечну циркуляцію слід враховувати тільки в прямокутному каналі. Додатковою рушійною силою, окрім різниці тисків, є рух границь каналу, на швидкості яких не накладаються ніякі обмеження.

Аналіз в'язкопластичного руху в плоскому каналі ґрунтується на простій реологічній моделі в'язкопластичності – бінгамовській (тіло Бінгама) [10 – 12], в яку входять дві характерні постійні: в'язкість матеріалу μ і порогова напруга зрушення $-\tau_0$ (порог плинності). Ці дві величини, взагалі, можуть самі залежати від швидкості зрушення, тиску, температури, але в даній роботі ці залежності не враховуються. Матеріал, який веде себе відповідно до цієї моделі, знаходиться в тому ж положенні відносно сімейства в'язкопластичних моделей, що і модель ньютонівської рідини відносно нелінійних в'язких рідин без порогу плинності.

Для в'язкопластичного руху характерна наявність двох принципово відмінних областей – квазітвердого ядра, в якому відсутній зсув, і області в'язкої течії. Для такого руху відповідна картина представлена на рисунку 1.

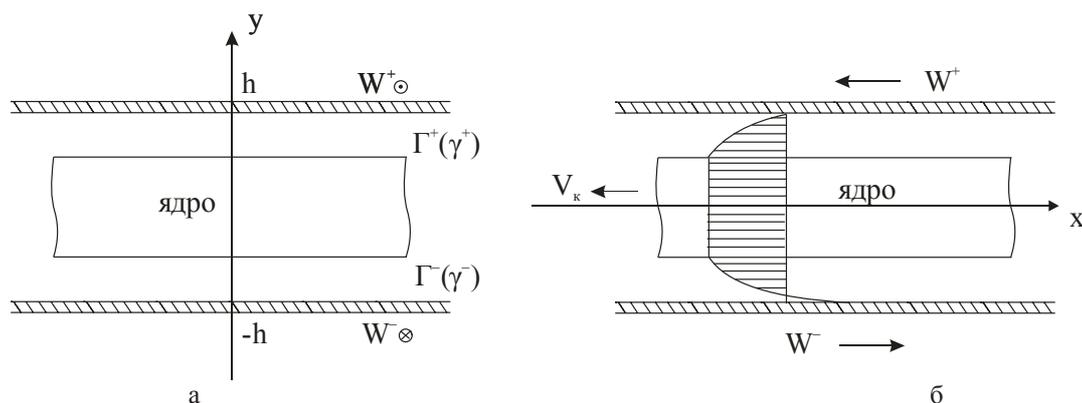


Рис. 1 – Модель в'язкопластичної течії

На рисунку 1а представлена картина течії анфас, а на рисунку 1б – та ж картина, але збоку (уздовж каналу). Границі квазітвердого ядра позначені як Γ^{\pm} . Задачу поздовжнього руху в плоскому каналі з єдиним компонентом швидкості V_x уздовж каналу на підставі рівнянь рівноваги, сформулюємо таким чином:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \pm \tau_0 \right); \quad V_x = \begin{cases} v^+, \Gamma^+ \leq y \leq h \\ v^-, h \leq y \leq \Gamma^- \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V^+(h) &= W^+, & V^+(\Gamma^+) &= V^-(\Gamma^-) = V_k \\ V^-(h) &= W^-, & \tau(\Gamma^+) &= \tau_0, \tau(\Gamma^-) = -\tau_0, \end{aligned}$$

де P — тиск;

x, y — координати вздовж і впоперек каналу відповідно;

V^{\pm} — швидкості в'язкої течії вище і нижче квазітвердого ядра відповідно;

$2h$ — ширина плоского каналу;

W^{\pm} — швидкості поздовжнього руху верхньої і нижньої границь каналу відповідно;

τ — здвигова напруга у в'язкопластичному матеріалі.

Вираження для швидкостей V^{\pm} і граничні умови можна представити у такому вигляді:

$$V^{\pm} = \frac{y^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} + \frac{c_1 \pm \tau_0}{\mu} y + c_2^{\pm},$$

$$\Gamma^+ \frac{dP}{dx} + c_1 = \tau_0,$$

$$\Gamma^- \frac{dP}{dx} + c_1 = -\tau_0,$$

$$\frac{h^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} - \frac{c_1 - \tau_0}{\mu} h + c_2^- = W^-, \quad (2)$$

$$\frac{h^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} + \frac{c_1 - \tau_0}{\mu} h + c_2^+ = W^+,$$

$$\frac{(\Gamma^+)^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} + \frac{c_1 - \tau_0}{\mu} \Gamma^+ + c_2^+ = \frac{(\Gamma^-)^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} + \frac{c_1 + \tau_0}{\mu} \Gamma^- + c_2^-,$$

у якому величини Γ^{\pm} , c_1 , c_2^{\pm} слід вважати невідомими, які підлягають визначенню. Із рівнянь (2) виходить, що ширина квазітвердого ядра виражається через dP/dx і τ_0 , таким чином:

$$\Gamma^+ - \Gamma^- = \frac{2\tau_0}{dP/dx}. \quad (3)$$

Якщо з другого і третього рівнянь (2) виключити c_1 і підставити результати в четверте і п'яте рівняння, то для координат границь ядра Γ^{\pm} виходить таке представлення:

$$\Gamma^{\pm} = \pm \frac{\tau_0}{dP/dx} + \frac{\left(\frac{1}{2}\right)(W^+ + W^-)}{\frac{h}{\mu} \frac{dP}{dx} - \frac{\tau_0}{\mu}}. \quad (4)$$

Якщо в цьому представленні покласти W^+ і W^- рівними нулю, то величини Γ^+ і Γ^- стануть рівними за абсолютною величиною. Це означає, що квазітверде ядро розміщується симетрично відносно середини каналу. У цьому випадку зручно прийняти для Γ^{\pm} без індексне позначення Γ . Отриманий результат можна представити також і в безрозмірному вигляді, а також у вигляді, що виражає зв'язок між Γ^{\pm} і Γ :

$$\begin{aligned} x &= h\eta; & \frac{\tau_0}{dP/dh} &= \gamma; \\ y &= h\xi; \end{aligned}$$

$$\Gamma^{\pm} = h\gamma^{\pm}; \quad \gamma^{\pm} = \pm\gamma + \frac{1}{2} \frac{(W^+ + W^-)}{dP/dh - (1 - \gamma)};$$

$$\Gamma^{\pm} = \frac{1}{2} \frac{\mu(W^+ + W^-)}{dP/dh} \cdot \frac{1}{h - \Gamma} \pm \Gamma; \quad (5)$$

$$\Gamma^{\pm} = \frac{1}{2} \frac{\mu(W^+ + W^-)}{\tau_0} \cdot \frac{\Gamma}{h - \Gamma} \pm \Gamma;$$

$$\gamma^{\pm} = \frac{1}{2} \frac{\mu(W^+ + W^-)}{h\tau_0} \cdot \frac{\gamma}{1-\gamma} \pm \gamma;$$

$$\Gamma^{\pm} = \gamma^{\pm} h.$$

З цих представлень виходить, що безрозмірні границі ядра визначаються величиною γ і безрозмірною швидкістю здвигу (приведеної до величини τ_0). Обчислення швидкості руху квазітвердого ядра V_k легко отримати з формул (2) і (5).

Отримані вираження для величини V_k приймають такий вигляд:

$$V_k = W^+ - \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (h - \Gamma^+)^2 = W^- - \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (h + \Gamma^-)^2;$$

$$V_k = \frac{W^+ + W^-}{2} - \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} [(h - \Gamma^+)^2 + (h + \Gamma^-)^2]; \quad (6)$$

$$V_k = \frac{W^+ + W^-}{2} - \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{d\eta} [(1 - \gamma^+)^2 + (1 + \gamma^-)^2] = \frac{W^+ + W^-}{2} - \frac{h}{2\mu} \frac{dP}{dx} \left[1 + \frac{\gamma^+ + \gamma^-}{2} + \gamma^- - \gamma^+ \right];$$

$$V_k = \frac{W^+ + W^-}{2} - \frac{h}{2\mu} \frac{dP}{d\eta} \left[(1 - \gamma)^2 - \gamma^2 \left(\frac{\mu(W^+ + W^-)}{h\tau_0} \right)^2 \frac{1}{(1 - \gamma)^2} - 1 \right].$$

Щоб знайти витрату \dot{V} течії в каналі, необхідно скласти три витрати – вище ядра, нижче ядра і витрату руху ядра. Результат відповідного обчислення в безрозмірному вигляді представляється наступною кубічною формою від величин γ^{\pm} :

$$\dot{V} = (W^+ + W^-) h (1 - \gamma^+ / 2 - \gamma^- / 2) -$$

$$- \frac{h^2}{2\mu} \frac{dP}{d\eta} \left(\frac{4}{3} - \gamma^+ + \gamma^- - (\gamma^+)^2 - (\gamma^-)^2 - \gamma^+ \gamma^- - \frac{(\gamma^+)^3}{6} + \frac{(\gamma^-)^3}{6} + \frac{\gamma^+ (\gamma^-)^2}{2} - \frac{(\gamma^+)^2 \gamma^-}{2} \right). \quad (7)$$

Якщо швидкості границь $W^{\pm} = 0$, то для витрати \dot{V} виходить формула, яка, у разі $\gamma \rightarrow 0$, переходить у відому формулу для витрати течії Пуазейля в плоскому каналі ньютонівської рідини:

$$\dot{V} = - \frac{h^2}{3\mu} \frac{dP}{d\eta} \left(1 - \frac{3\gamma}{2} + \frac{\gamma^3}{2} \right). \quad (8)$$

Фізичний сенс умови $\gamma=0$ означає, що або $\tau_0=0$, або $dP/dx \rightarrow \infty$, або $\tau_0/dP/dx \rightarrow 0$. При рухові високов'язких матеріалів дисипативне тепло, яке безповоротно виділяється, є одним з основних джерел нагріву. Для обчислення потужності виділення дисипативного тепла потрібно скористатися такими вираженнями для швидкостей:

$$V^+ = W^+ - \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (h^2 - y^2) + \frac{\Gamma^+}{\mu} \frac{dP}{dx} (h - y);$$

$$V^- = W^- - \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (h^2 - y^2) + \frac{\Gamma^-}{\mu} \frac{dP}{dx} (h + y). \quad (9)$$

Диференціювання цих виражень по y , зведене в квадрат і наступну інтеграцію по y в межах $[-h, +h]$ призводить до наступного вираження для густини виділення тепла \dot{e} :

$$\dot{e} = \frac{h}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right)^2 \left[(1 - \gamma^+)^3 - (1 - \gamma^-)^3 \right]. \quad (10)$$

Особливістю цього вираження є той факт, що швидкості W^{\pm} явно в нього не входять (неявна залежність \dot{e} від W^{\pm} забезпечена їх входженням у величини γ^{\pm}).

На підставі отриманих результатів легко можна перейти до плоского каналу, границі якого розташовані вертикально, а відстань між ними рівна a . У такому разі в усіх отриманих формулах потрібно всюди, де зустрічається величина h , виконати її заміну на a . З урахуванням останнього

зауваження, результати, отримані в роботі будуть надалі використані при побудові за швидкістю руху в'язкопластичного матеріалу в прямокутному каналі з довільним поздовжнім розподілом граничних швидкостей.

Література:

1. Кузнецов О.а. Реология пищевых масс. – Оренбург. 2005. – 234с.
2. Герман Х. Шнековые машины в технологии. – Л.:Химия. – 1975. –229с.
3. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. – Л.: ГНТИ химической литературы. – 1962. – 447с.
4. Бернхардг Э. Переработка пластических масс. – М.:Химия. – 1965. – 746с.
5. Маккелви Д.М. Переработка полимеров. – М.:Химия. – 1965. – 348с.
6. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.:Химия. – 1984. – 628с.
7. Ким А.С., Калашников Ю.В., Басов Н.И. Техника переработки пластмасс. – М.:Химия. – 1985. – 528с.
8. Прессы пищевых и кормовых производств. – под ред. А.Я.Соколова. – М. – 1973. – 232с.
9. Райнер М. Реология. – М.: Наука. ГРФМЛ. – 1965. – 223с.
10. Фрейденталь А., Гейнгер Х. Математические теории неупругой сплошной среды. – М.:ГИТТЛ – 1962. – 432с.
11. Магихин Ю.А., Магихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.:– 1981. – 616 с.

УДК 661.635.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТРИМЕТАФОСФАТА НАТРИЯ ПУТЕМ ДЕГИДРАТАЦИИ ОДНОЗАМЕЩЕННОГО ОРТОФОСФАТА НАТРИЯ

Черемисинова А.А., аспирант,
Сорока П.И., д-р техн. наук, профессор,
Волкова С.А., канд. физ.-мат. наук, доцент,
Стеба В.К., канд. техн. наук, доцент,
Степневская Я.В.канд. химич. наук, ассистент
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»,
г. Днепрпетровск

Исследован процесс термической дегидратации $NaH_2PO_4 \cdot 1,3H_2O$ в неизотермических условиях и предложена химическая схема протекания этого процесса, рассчитаны кинетические параметры отдельных стадий, на основе математической модели процесса, получены кривые распределения концентраций продуктов дегидратации в зависимости от времени, температуры процесса и скорости нагрева образца и представлена сравнительная зависимость расчетной и экспериментальной степени превращения от температуры.

There was investigated the process of thermal dehydration of $NaH_2PO_4 \cdot 1,3H_2O$ in nonisothermal conditions and offered a chemical scheme of the course of this process. The kinetic parameters of separate stages were calculated. On the basis of a mathematical model of the process there were received the distribution curve of the dehydration products concentration depending on time, temperature of the process and heating speed of the sample and there was presented the comparative dependence of the calculated and experimental degree of transformation on the temperature.

Ключевые слова: однозамещенный ортофосфат натрия, триметафосфат натрия, дегидратация, константа скорости, энергия активации, математическое моделирование, степень превращения.

Неорганические конденсированные фосфаты находят широкое применение в строительной промышленности, в процессах высокотемпературной обработки металлов давлением, в косметической и пищевой промышленности [1]. Это в полной мере относится к триметафосфату натрия, который получают дегидратацией однозамещенного ортофосфата натрия при температурах до 500 °С.