

Додавання зернобобової сировини покращує розчинність готового виробу за рахунок часткового переходу розчинних білкових речовин у розчин. Хімічний склад отриманих композицій наведено в таблиці 4.

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що внесення запропонованих компонентів до рецептури збільшує вміст у продуктах білків від 1,8 до 4,1%, харчових волокон і зменшує вміст вуглеводів від 5,5 до 16%. Отже, було розроблено рецептурні композиції корпусу для коекструзійних продуктів з підвищеною харчовою цінністю. Як добавки рекомендовано використовувати горох – 30%, квасолю – 30%, люпин – 15 %, сочевицю – 25% і соняшниковий шрот – 10%.

Запропоновані основи моделювання дозволяють розробляти рецептурні композиції з урахуванням технологічних особливостей процесу виробництва та вимог нутриціології до продуктів харчування.

Список літератури

1. Химия и биохимия бобовых растений: [пер. с англ. К.С. Спектрова]; под ред. М.Н. Запрометова. – М.: Агропромиздат, 1986. – 335 с.
2. Химический состав пищевых продуктов. Кн. 2: Справочные таблицы содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов, органических кислот и углеводов / Под ред. И.М. Скурихина, М.Н. Волгарева. – 2-е изд. – М.: Агропромиздат, 1987. – 360 с.
3. Ильчакова Ж.А. Технологическая оценка бобового сырья для производства кулинарной продукции / Ж.А. Ильчакова, О.А. Гринченко, П.П. Пивоваров // Продукты & ингредиенты. – 2006. – № 12. – С. 70-71.
4. Леонтьев В.М. Чечевица / В.М. Леонтьев. – Л.: Колос, 1996. – 256 с.
5. Пикуза В. Экономические расчеты и бизнес-моделирование в Excel / В. Пикуза. – Питер, 2012. – 400 с.
6. Бондар Н.П. Дослідження технологічних властивостей харчового люпину і розробка способів використання його у хлібопекарській промисловості: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01 / Н.П. Бондар / Національний ун-т харчових технологій. – К., 2006. – 20 с.

УДК 664.002.5

Кюрчев С.В., канд. техн. наук,
Змеєва І.М. (ТДАТУ, Мелітополь)

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ СТРУМЕНЯ ЗА УМОВИ ПАДІННЯ ЙОГО НА ДНО БАНКИ

У статті побудовано математичну модель процесу розливання харчової рідини в скляну тару та проаналізовано гідродинамічну поведінку струменя за допомогою числового моделювання на основі програмного комплексу ANSYS.

Ключові слова: фасування харчової рідини, дозатор, числове моделювання, струмінь, розподіл поля швидкостей.

Постановка проблеми і її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями. Важливим параметром, що визначає продуктивність розливающего пристрою, є час заповнення банки рідиною до зазначеного рівня, який суттєво залежить від абсолютної величини швидкості витікання рідини, площі живого перерізу зазору між напрямною та ущільнювальною манжетною, через який рідина попадає у банку, геометричних параметрів конструктивних елементів, а також фізико-хімічних властивостей харчової рідини, яка розливається (в'язкості, густини, теплопровідності, теплоємності). Варіюючи кут нахилу та геометричні розміри напрямної, можна досягти максимальної продуктивності у фасуванні певного виду харчової рідини [1-3].

Метою статті є вивчення гідродинамічної поведінки струменя під час розпаду та вплив на точність дозування в дозуючій системі в межах заданого об'єму, конструктивних особливостей дозувального пристрою.

Виклад основного матеріалу досліджень. Як впливає з рисунка 1 [4], за умови падіння струменя рідини на дно банки спостерігається дуже складна картина.

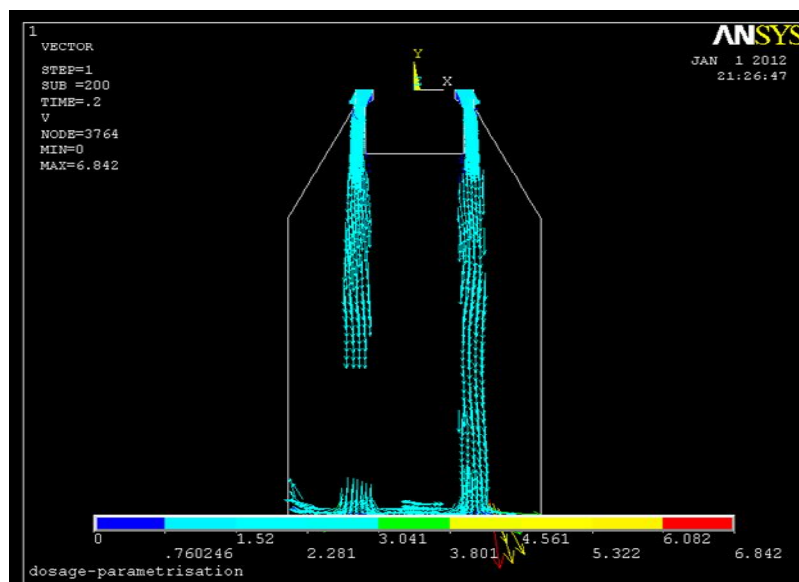


Рисунок 1 – Падіння рідини на дно банки

Вивчимо, на які струмені розпадеться струмінь товщиною d_0 , якщо він падає зі швидкістю v під кутом α на площину. Позначимо через d_1 і d_2 товщину струменів, як показано на рисунку 2, які отримали в результаті розпаду вихідного струменя, а через v_1 та v_2 – їх швидкість. Оскільки через поперечний переріз вихідного падаючого струменя за одну секунду проходить така ж маса рідини, що й через поперечні перерізи обох утворених струменів, і рідина є нестисливою, то [5]

$$\rho d_0 v = \rho d_1 v_1 + \rho d_2 v_2, \quad (1)$$

де ρ – густина рідини.

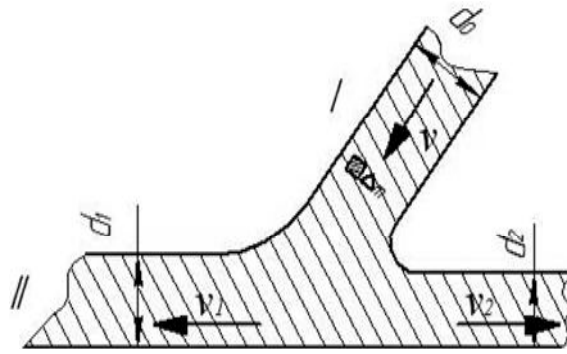


Рисунок 2 – Розподіл струменя

Знайдемо, як змінюється швидкість частинок рідини. Для цього прослідкуємо за невеликою масою Δm рідини, яка переміщується з основного вихідного струменя в лівий рукав.

Таке переміщення є рівнозначним просто переносу цієї рідини з області I в область II. Але з області I ми «вилучаємо» об'єм рідини V_1 , при цьому сили тиску виконують роботу $A_1 = p_1 V_1$. У області II робота сил тиску від'ємна та дорівнює $A_2 = -p_2 V_2$. Таким чином, сумарна робота A зовнішніх сил дорівнює $p_1 V_1 - p_2 V_2$. Оскільки рідина нестискається, то маємо $V_1 = V_2$. Крім того, величина тиску в усіх струменях також однакова та дорівнює атмосферному тиску, тому що границі у струменів плоскі. Відповідно $A = 0$. Згідно з теоремою про кінетичну енергію, зміна кінетичної енергії маси Δm рідини дорівнює роботі зовнішніх сил A . В результаті маємо, що кінетична енергія частинок рідини та їх швидкість залишаються постійними $v = v_1 = v_2$.

Тому з рівності (1) одержимо

$$d_0 = d_1 + d_2, \quad (2)$$

Оскільки на рідину не діють жодні зовнішні горизонтальні сили, то горизонтальна проекція імпульсу рідини, що тече, повинна залишатись постійною

$$mv \cos \alpha = m_1 v_1 - m_2 v_2,$$

де m, m_1, m_2 – маса рідини, яка пройшла через перерізи струменів за один і той же час.

Ураховуючи, що $m \sim d_0, m_1 \sim d_1, m_2 \sim d_2$, то

$$d_0 \cos \alpha = d_1 - d_2, \quad (3)$$

Із рівностей (2) і (3) отримуємо

$$d_1 = d_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad d_2 = d_0 \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

Відповідно до формули (4) вважали, що тиск у всіх випадках дорівнює атмосферному. Але це твердження справедливе тільки далеко від місця падіння струменя на площину, де струмінь плоский. У тій точці, де струмінь падає на площину, він викривляється і тиск тут є іншим. Його нескладно знайти.

Оскільки сила \vec{F} , що діє на струмінь з боку площини, дорівнює швидкості зміни проекції імпульсу \vec{K} струменя на вісь Y , перпендикулярну до площини, то

$$F = \frac{\Delta K_y}{\Delta t} = \frac{K \sin \alpha}{\Delta t}.$$

За час Δt на площину попадає об'єм рідини $V = Sv\Delta t$, що має масу $M = \rho Sv\Delta t$ та імпульс $K = Mv = \rho Sv^2\Delta t$, де S – площа перерізу струменя.

У результаті маємо

$$F = \frac{\rho Sv^2 \sin \alpha \cdot \Delta t}{\Delta t} = \rho Sv^2 \sin \alpha.$$

Площа S зони підвищеного тиску приблизно дорівнює площі перерізу струменя. Тому

$$p \approx \frac{F}{S} = \rho v^2 \sin \alpha. \quad (5)$$

Легко впевнитись, що тиск, розрахований за формулою (5), має величину атмосферного порядку. Наприклад, у разі нормального падіння на площину ($\alpha = 90^\circ$) струменя води, швидкість якого, як впливає з рисунка 1, дорівнює 6 м/с, величина тиску складає $p \approx 3,6 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. Тому формули (4) залишаються справедливими.

Бокові струмені в подальшому ударяються у бокові стінки банки та, завертаючись, утворюють повітряні порожнини всередині рідини, як показано на рисунку 3 [4].

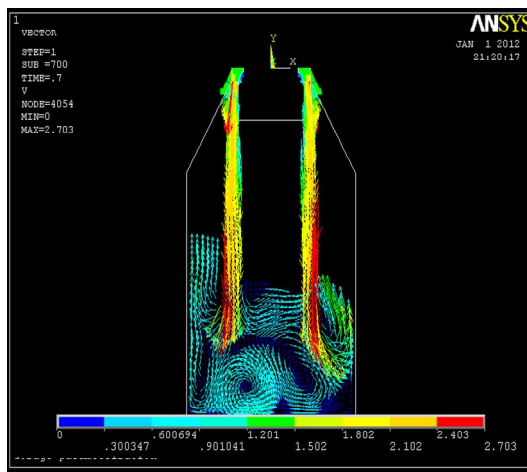


Рисунок 3 – Утворення повітряних порожнин усередині рідини

Припустимо для простоти, що утворена порожнина має сферичну форму радіуса a , та визначимо час, за який ця порожнина заповниться рідиною.

Рух рідини після утворення повітряної порожнини буде центрально-симетричним зі швидкостями, що направлені в кожній точці уздовж радіуса до центру. Для радіальної швидкості $v_r \equiv v < 0$, маємо рівняння Ейлера (у сферичних координатах)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (6)$$

Рівняння неперервності дає

$$r^2 v = F(t), \quad (7)$$

де $F(t)$ – довільна функція часу. Ця рівність відображає той факт, що внаслідок нестисливості рідини об'єм, що протікає через сферу довільного радіуса, не залежить від останнього.

Підставимо швидкість v із (7) у (6) та отримаємо

$$\frac{F'(t)}{r^2} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}.$$

Проінтегруємо це диференціальне рівняння за змінною r від ∞ до радіуса порожнини, що заповнюється рідиною, та одержимо $R = R(t) \leq a$

$$-\frac{F'(t)}{R(t)} + \frac{\mathcal{G}^2}{2} = \frac{p_0}{\rho}, \quad (8)$$

де $\mathcal{G} = \frac{dR(t)}{dt}$ – швидкість зміни радіуса порожнини;

p_0 – тиск на нескінченності. Швидкість рідини на нескінченності, а також тиск на поверхні бульбашки дорівнюють нулю. Співвідношення (7) для точок на поверхні бульбашки дає

$$F(t) = R^2(t) \mathcal{G}(t).$$

Підставимо цей вираз для $F(t)$ у рівняння (8). У результаті отримуємо таке рівняння

$$-\frac{3\mathcal{G}^2}{2} - \frac{1}{2} R \frac{d\mathcal{G}^2}{dR} = \frac{p_0}{\rho}. \quad (9)$$

У цьому диференціальному рівнянні (9) змінні розділяються. Проінтегрувавши (9) за наявності початкової умови: $\mathcal{G} = 0$ при $R = a$ (у початковий момент рідина перебуває у стані спокою), знаходимо

$$\mathcal{G} = \frac{dR}{dt} = -\sqrt{\frac{2p_0}{3\rho} \cdot \left(\frac{a^3}{R^3} - 1\right)}.$$

Звідси маємо для шуканого повного часу заповнення порожнини рідиною

$$\tau = \sqrt{\frac{3\rho}{2p_0}} \int_0^a \frac{dR}{\sqrt{\frac{a^3}{R^3} - 1}}. \quad (10)$$

Цей інтеграл перетворюють у В-інтеграл Ейлера, обчислення якого дає

$$\tau = \sqrt{\frac{3\rho \pi a^2}{2p_0}} \cdot \frac{\Gamma(5/6)}{\Gamma(1/3)} = 0,915a \sqrt{\frac{\rho}{p_0}}. \quad (11)$$

Таким чином, час заповнення утвореної порожнини рідиною прямо пропорційний її радіусу.

Велику роль у струменевій течії відіграє гідродинамічна нестійкість, яка притаманна течії поблизу вільної лінії течії. Відомо, що коливання з довільною довжиною хвилі та нескінченно малою амплітудою, які накладаються на вільну лінію течії біля її початку, збільшуються вниз по течії за експоненціальним законом. Показник степея експоненти, що характеризує швидкість зростання амплітуди збурення, пропорційний величині $\sqrt{\rho_E/\rho_1}$. Тут ρ_E – густина оточуючого рідкого середовища, ρ_1 – густина рідини у струмені. Якщо $\rho_1 \gg \rho_E$ (наприклад, струмінь рідини в газовому середовищі), то коливання розвиваються порівняно повільно та помітні лише на великій відстані від джерела струменя. При цьому на достатній відстані спостерігається ламінарний режим течії струменя. Якщо $\rho_E/\rho_1 \sim 1$ (наприклад, струмінь рідини в рідкому середовищі або газовий струмінь у газовому середовищі) – пульсації будуть розвиватись на порівняно невеликій відстані від джерела струменя, що приведе до швидкого встановлення турбулентного режиму течії в затопленому струмені. Г.Н. Абрамович у ході вивчення затоплених турбулентних струменів встановив, що струмінь, який витікає у спокійну рідину, поступово розширюється і в результаті розсіюється в масі спокійної оточуючої рідини. Розширення (розсіювання) струменя пояснюється тим, що енергія струменя передається поближким шарам рідини, які починають рухатись разом зі струменем. Нарешті, коли $\rho_E \gg \rho_1$ (наприклад, газовий струмінь у рідині), відбувається практично миттєвий розпад струменя на окремі фрагменти.

Визначимо глибину проникнення струменя довжиною l у товщу рідини, яка знаходиться на дні банки. У рідині утворюється каверна, по стінках якої починає розтікаться струмінь. Позначимо через v_1 швидкість головки струменя, яка набула форми гриба із шапкою, а через v – швидкість струменя, що відображено на рисунку 4. В системі відліку, яка рухається зі швидкістю v_1 , швидкість струменя дорівнює $(v - v_1)$, а швидкість рідини дорівнює $-v_1$. У вершині головки струменя зустрічаються два струмені, які рухаються праворуч і ліворуч. Їх тиск має співпадати. А оскільки тиск пропорційний ρv^2 , то

$$\rho(v - v_1)^2 = \rho v_1^2.$$

Звідси

$$v_1 = \frac{v}{2},$$

тобто швидкість проникнення струменя дорівнює половині швидкості струменя.

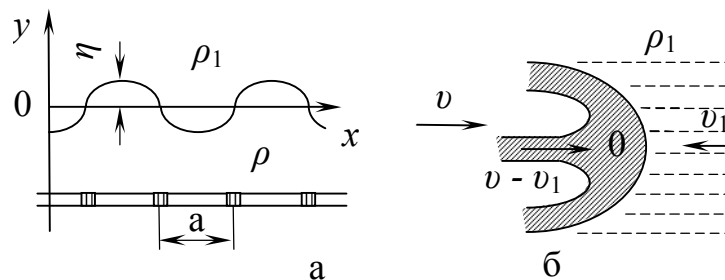


Рисунок 4 – Форма струменя

Струмінь буде проникати в рідину доти, доки вся вона не пройде в точку O , тобто протягом часу

$$\tau = \frac{l}{v - v_1} = \frac{2l}{v}.$$

За цей час струмінь проб'є шар рідини товщиною

$$L = \frac{v}{2} \tau = \frac{lv}{2(v - v_1)} = l,$$

тобто струмінь проб'є шар рідини, товщина якого дорівнює довжині струменя. Після пробивання шару рідини, товщина якого менше від довжини струменя, швидкість струменя буде дорівнювати початковій. З цією швидкістю

струмінь падає на пружне дно банки, при цьому буде справедливим розглянутий вище процес.

Висновки. У статті побудовано математичну модель процесу розливання харчової рідини в скляну тару та проаналізовано її гідродинамічну поведінку за допомогою числового моделювання на основі програмного комплексу ANSYS.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку. Числове моделювання процесу заповнення тари харчовою рідиною дозволить обґрунтувати вплив конструктивних, технологічних факторів і фізико-хімічних властивостей харчових рідин на критерії оптимізації – продуктивність і точність дозування. Це дозволить розраховувати реальні елементи фасувального обладнання.

Список літератури

1. Ярмолинский Д.А. Элементы конструкций автоматов линий розлива вин (расчет и конструирование) / Д.А. Ярмолинский, Ц.Р. Зайчик. – М.: Машиностроение, 1974.
2. Степанов И.А. Автоматические линии розлива пищевых жидкостей / И.А. Степанов, П.Н. Галасов. – М.: Пищ. пром-сть, 1971.
3. Харитонов Н.Ф. Автоматы и поточные линии вин / Н.Ф. Харитонов, Д.А. Ярмолинский. – М.: Машиностроение, 1967.
4. Madenci E. The finite element method and applications in engineering using ANSYS / E. Madenci, I. Guven. – Springer Science+Business Media, 2006. – 686 p.
5. Лавріненко Н.М. Кінцево-елементне моделювання в інженерних розрахунках / Н.М. Лавріненко [та ін.]. – Донецьк: Норд-Прес, 2008. – 668 с.

УДК 330.43:664.87

Маковецька С.В., Сєдих О.Л., Запотоцька О.В.,
Ковбаса В.М., д-р техн. наук, проф. (НУХТ, Київ)

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ РЕЦЕПТУРИ КОРПУСУ ДЛЯ КОЕКСТРУЗІЙНИХ ПРОДУКТІВ ШЛЯХОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ДОДАВАННЯМ КВАСОЛІ АБО ЧЕЧЕВИЦІ

У статті досліджено оптимальне використання рецептурних композицій корпусу для коекструзійних продуктів з підвищеним вмістом білка з використанням квасолі або чечевиці. За допомогою MS Excel розроблено рецептурні композиції з урахуванням технологічних особливостей процесу виробництва та вимог нутриціології до продуктів харчування.

Ключові слова: математичне моделювання, коекструзійні продукти, квасоля, чечевиця, вбудований засіб Excel «Поиск решения».

Постановка проблеми та її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями. Харчування людини є найбільш суттєвим фактором, який безпосередньо впливає на її здоров'я. Сьогодні в усьому світі, зокре-