



**Рис. 2.** Залежність частки сиропу в змішаному розчині від тиску подачі води при різних значеннях відстані між соплами форсунок  $a$ , мм: а – при напорі купажного сиропу 0,3 м, б – при напорі купажного сиропу 0,4 м

При відстані між соплами форсунок 12 мм ( $a = 3d_c$ ), тиску подачі води 0,36 МПа, напорі купажного сиропу 0,4 м, отримали частку сиропу у змішаному розчині 0,25, що є позитивним результатом, який відповідає вимогам технологічної інструкції виготовлення безалкогольного напою «Лимонад». В результаті проведення експерименту було виявлено, що при відстані між форсунками, рівній діаметру сопла форсунки частка купажного сиропу у готовому розчині зменшується із збільшенням тиску подачі основного компонента – води. Не залежно від напору подачі купажного сиропу, із збільшенням відстані між форсунками від  $a = d_c$  до  $a = 3d_c$  частка сиропу у змішаному розчині збільшується.

**Ю.Ю. Доломакін**, асист. (НУХТ, Київ)

**І.Г. Бабанов**, канд. техн. наук, доц. (НУХТ, Київ)

**І.В. Житнецький**, канд. техн. наук, доц. (НУХТ, Київ)

## РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ХАРЧОВИХ СУСПЕНЗІЙ

Реологію зазвичай визначають як науку про вивчення текучості та деформації речовин. Її походження пов'язано із спостереженням за аномальною поведінкою багатьох відомих матеріалів, що демонструють властивості як рідин, так і твердих речовин. Це робить необхідним встановити адекватні методи для їх охарактеризування. Це можливо реалізувати експериментальним підтвердженням істотних змін властивостей речовин у часі та використанням феноменологічних моделей.

Харчові суспензії в основному відносять до в'язких рідин, але при великих концентраціях твердої фази вони вже класифікуються як в'язко-пластичні та пластичні. Такі концентровані суспензії не течуть

нижче певної граничної напруги ( $\tau_0$ ), яку називають граничним напруженням зсуву. Найпопулярніші моделі, що описують це явище, це моделі Гершеля-Балклі (1) та моделі Кессона, звичайна (2а) та модифікована (2б):

$$\tau = \tau_0 + K_1(\dot{\gamma})^n. \quad (1)$$

$$\tau^{1/2} = (\tau_0)^{1/2} + K_1(\dot{\gamma})^{1/2}. \quad (2a)$$

$$\tau^{1/2} = (\tau_0)^{1/2} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}, \quad (2b)$$

де  $K$  – індекс консистенції;  $n$  – індекс псевдопластичності. У всіх цих моделях,  $K$  є постійним параметром, з виміром часу, а  $n$  або  $m$  є безрозмірною константою.

Також суспензії показують складну поведінку з граничною в'язкістю  $\eta_0$  в режимі низької швидкості зсуву та іншої граничної в'язкості  $\eta_\infty$  в режимі високої швидкості зсуву. Така модель поведінки описується рівнянням Кросса:

$$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = (K\dot{\gamma})^m. \quad (3)$$

Аналогічним рівнянням, що описує цю складну поведінку є рівняння Карро:

$$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = \frac{1}{(1 + (K_1\dot{\gamma})^2)^{n/2}}. \quad (4)$$

Ще одна модель, яка підходить для великої кількості суспензій – модель Сіско (5), яка виходить з рівняння Кросса. Ця модель справедлива для речовин зі зменшенням в'язкості при зсуві, де в'язкість при нульовій швидкості зсуву прямує до нескінченності

$$\eta = \eta_\infty + K_2(\dot{\gamma})^{n-1}. \quad (5)$$

Перша модель, що об'єднує в'язкість та об'ємну частку частинок, з'явилась завдяки Ейнштейну:

$$\eta = \eta_s(1 + 2,5\phi). \quad (6)$$

Інша модель, що розроблена Бахелором (7) розглядає гідродинамічні взаємодії, які стають важливішими, при зростанні  $\phi$ :

$$\eta = \eta_s (1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2) \quad (7)$$

Однією з найбільш популярних емпіричних моделей, що описують залежність в'язкості з твердою фракцією для концентрованих суспензій є модель Кригера-Догерті (8), який вводить поняття істинної в'язкості  $[\eta]$  і використовує значення 2,5 для суспензій сферичних частинок:

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2,5\phi_m} \quad (8)$$

Попередні моделі дійсні для систем мономодальних сфер (твердих або м'яких), але не враховують відмінностей в розмірах і/або форми. Перша модель для бімодальних суспензій була розроблена Фарісом (9):

$$\eta = \eta_s \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{\phi_i}{\phi_{mi}}\right)^{-2,5\phi_{mi}} \quad (9)$$

Барнс відкрив вплив форми частинок в релогічних суспензіях, демонструючи, що в'язкість збільшується а  $\phi_m$  зменшується завдяки зміні форми від сферичної до пластинчастої та паличковидної форм. Є також більш пізні моделі для опису поведінки слабо флокуляційних суспензій, таких як модель Воутерсена-де Кройфа:

$$\eta_{r,0} = 1 + 2,5\phi + \left(6,2 + \frac{2,1}{\phi_m}\right) \phi^2 \quad (10)$$

Отже, реологія суспензій залежить від балансу між трьома основними силами: броунівської дифузії, гідродинамічної взаємодії і агломератного потенціалу. Ці сили контролюються об'ємною часткою дисперсних частинок  $\phi$ , їх формою і розподілом за розмірами і агломератом взаємодій, які можуть бути змінені додаванням флокулянтів. Коли величина твердої фракції збільшується, взаємодія між сусідніми частинками також збільшується, проте вона обмежується структурною взаємодією. Ця концентрація визначає максимальну щільність фракції ( $\phi_m$ ). Отже, передбачення зв'язку між зниженням в'язкості  $\eta_r$  (яка визначається як в'язкість суспензії, поділена на в'язкість середовища  $\eta_s$ ) і об'ємної частки частинок має велике технологічне значення.