



УДК 621

ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩ В УМОВАХ ЇХНЬОЇ ІНТЕНСИВНОЇ ОБРОБКИ

Берник Ірина Миколаївна, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

I. Bernyk, PhD, Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University

Здійснено аналіз реологічних моделей, що описуються різними законами течії. З'ясовано, що наявність в дисперсних середовищах в'язких властивостей суттєво впливає на інтенсифікацію процесів їхньої обробки. Виявлено наявність різних підходів до врахування в'язких властивостей середовищ, що знаходяться в умовах дії на них певних величин тисків та швидкостей. Встановлено, що інтенсифікуючим способом виконання технологічного процесу являється гармонізація параметрів випромінювача і середовища на основі ціленаправленого їх використання. Для ультразвукових кавітаційних методів обробки доцільно використовувати методи феноменологічної реології та енергетичний підхід.

Ключові слова: середовище, в'язкість, реологічна модель, дисипація, коефіцієнт згасання, ультразвукова технологія, інтенсифікація, енергетичний підхід.

Ф. 8. Табл. 1. Літ. 10.

1. Постановка проблеми

Серед найбільш розвинених і ефективних методів обробки різних технологічних середовищ чільне місце належить ультразвуковій технології, внаслідок значної інтенсифікації протікання того чи іншого процесу за мінімальними витратами енергії та забезпечення високої якості отриманого результату [1, 2]. Сутність такої технології полягає у передачі енергії в оброблюване середовище, що спонукає інтенсифікації процесів диспергування, екстрагування, емульгування і т.п. [3].

Інтенсифікуючий характер виконання технологічного процесу обумовлено параметрами випромінювача (енергія, амплітуда, частота коливань) та середовища (щільність, в'язко-пластичні властивості, модуль пружності, швидкість розповсюдження хвиль) [4].

Безумовною передумовою є гармонізація параметрів випромінювача і середовища, що в свою чергу потребує достатньо коректного врахування вище згаданих параметрів. Точність визначення параметрів і режимів обумовлюється і тою обставиною, що більшість режимів обробки запропоновано використовувати в резонансі. А знехтування будь-якою реологічною властивістю середовища не може гарантувати забезпечення резонансного режиму.

Особливо важливою характеристикою в резонансному режимі є дисипативна, оскільки саме вона обмежує ступінь зростання резонансної амплітуди, а дві інші характеристики – пружна і інерційна, що врівноважуються в резонансі, також певною мірою залежать від розсіювання енергії. Вдосконалення режимів, підвищення ефективності кавітаційного процесу лежить саме в площині оцінки взаємодії середовища і кавітаційного апарату та створення на цій основі інтенсифікуючих процесів обробки технологічних середовищ.

2. Мета дослідження

Метою роботи є аналіз законів зміни в'язкості дисперсних середовищ та обґрунтування методик врахування її в теоретичних та експериментальних дослідженнях системи «апарат – середовище».

3. Результати дослідження

Теорія поведінки середовищ, що розглядаються як в'язкі рідини, заснована на моделі Ньютона [1, 3], що встановлює лінійний зв'язок між дотичними напруженнями та відповідними швидкостями незворотної деформації зсуву, описує модель середовища, як лінійно-в'язку нестискувану рідину узагальненим законом Ньютона в тензорному вигляді:

$$\tau_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

де τ_{ij} – компоненти тензора напружень; p – тиск; δ_{ij} – компонента переміщення; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості; $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненти вектора швидкості.

Для умов одномірного зсуву течії нестискуваної рідини (1) формулюється в наступному вигляді [5]:



$$\tau = -\mu \cdot \frac{du}{dy} = -\mu \dot{\gamma}, \quad (2)$$

або

$$\tau = -\nu \cdot \frac{d(pu)}{dy}, \quad (3)$$

де $\nu = \mu / \rho$ – кінематична в'язкість; u – швидкість; y – координата, поперечна до напрямку течії; ρ – щільність.

Графік залежності τ від $\dot{\gamma} = du / dy$ для ньютонівської рідини має вигляд прямої. Тангенс кута її нахилу α до осі $\dot{\gamma}$ збігається з величиною μ – реологічним параметром моделі, при цьому μ не залежить від переміщення швидкості, прискорення, кінематичних характеристик, сили, напруження.

Лінійній моделі відповідають лише прості рідини. Більш складні за структурою рідини, наприклад, розчини, дисперсні текучі системи в більшості випадків мають криву течії, не співпадаючу з ньютонівською.

В даний час існує велика кількість напівемпіричних і емпіричних реологічних моделей, серед яких можна відзначити, відповідно до [6], найбільш часто вживані в наукових дослідженнях моделі – псевдопластичні («чисто в'язкі») середовища, а також в'язкопластичні середовища, що описуються різними законами течії (табл. 1).

Слід зазначити, що більшість із зазначених вище кривих течії не характеризують в повному обсязі всі механічні поведінки неньютонівських рідин в усьому можливому діапазоні швидкостей зсуву, а передають лише часткові особливості реальної течії.

Відомо [5, 6], що будь-яка неньютонівська рідина має лінійні ділянки кривої течії при малих ($\dot{\gamma} \rightarrow 0$) і великих (вельми великих) швидкостях зсуву ($\dot{\gamma} \rightarrow \infty$). У першій області реалізується т.зв. «найбільша» ньютонівська в'язкість μ_0 або «в'язкість при нульовій швидкості зсуву». У другій області – т.зв. «найменша» ньютонівська в'язкість μ_∞ або «в'язкість при нескінченно великому зсуві». Удавана в'язкість для ступеневих моделей правильно передає реальну поведінку непластичних чисто вузьких середовищ і в проміжній області μ_0 і μ_∞ . Однак, при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ або $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ такі моделі далекі від реальних, оскільки виходять абсурдні висновки.

Таблиця 1

Основні закони реологічних моделей, що враховують в'язкі і в'язко-пластичні властивості дисперсних середовищ

Модель середовища	№ п/п	Назва закону	Аналітична залежність
1	2	3	4
В'язка	1	Оствальда-де Віля	$\tau = k \cdot \dot{\gamma} ^{n-1} \cdot \dot{\gamma}, \quad n > 1$
	2	Елліса	$\tau = (A + B \cdot \tau ^{\alpha-1})^{-1} \cdot \dot{\gamma}, \quad \alpha > 1 \text{ або } \alpha < 1$
	3	Сіско	$\tau = (A + B \cdot \tau ^{n-1}) \cdot \dot{\gamma}, \quad n > 0$
	4	де Хавена	$\tau = (\mu_0 \cdot \dot{\gamma}) / (1 + C \cdot \tau ^n), \quad n > 0$
	5	Прандтля	$\tau = A \cdot \dot{\gamma} \cdot \arcsin(\dot{\gamma} / c)$
	6	Прандтля-Ейрінга	$\tau = \operatorname{arsh}(\dot{\gamma} / B)$
	7	Ейрінга	$\tau = \dot{\gamma} / B + C \cdot \sin(\tau / A)$
	8	Пауля-Ейрінга	$\tau = \left[C + \frac{1}{B \cdot \dot{\gamma} } \cdot \operatorname{arsh}\left(\frac{\dot{\gamma}}{A}\right) \right] \cdot \dot{\gamma}$
	9	Уільямсона	$\tau = [A / (B + \dot{\gamma}) + \mu_\infty] \cdot \dot{\gamma}$



Продовження таблиці 1

1	2	3	4
В'язка	10	Рейнера-Філіппова	$\tau = \left[\mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + (\tau / A)^2} \right] \cdot \dot{\gamma}$
В'язко-пластична	11	Шведова-Бінгама	$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$
	12	Гершеля-Балклі	$\tau = \tau_0 + A(\dot{\gamma})^n$
	13	Бріана	$\tau = \mu_{\infty} \cdot \dot{\gamma} \cdot \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{\mu_{\infty} \cdot m \cdot \dot{\gamma}} \right)^m$
	14	Кроулі-Кітца	$\tau = \mu_{\infty} \cdot \left[\frac{1,2 + V(\theta_0 \cdot \tau^{-0,2} + 1)^3}{1,2 - 2V(\theta_0 \cdot \tau^{-0,2} + 1)^3} \right] \dot{\gamma}$
	15	Кессона	$\tau = (k_0 + k_2 \cdot \dot{\gamma}^{1/2})^2$
	16	Шульмана	$\tau = \left[\tau_0^{1/n} + (\mu_p \cdot \dot{\gamma})^{1/m} \right]^n$

параметри $k, n, m, \alpha, \mu_0, \mu_{\infty}, \mu_p, \theta_0$ – постійні та параметри; $A, B, C, \phi_0, \tau_1, \phi_{\infty}$ – реологічні параметри і коефіцієнти, які визначаються для конкретних рідин; $\phi = 1 / \mu$ – плинність середовища.

Наприклад, моделі Елліса, Рабиновича, де Хавена при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ (і малих напруженнях зсуву), а також при τ помірних правильно відображають реальність течії, але при $\tau \rightarrow \infty$ мають нульову в'язкість, а в моделі Сіско при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ в'язкість наближається до нескінченно великих величин. Однак, більшість з наведених вище моделей все ж якісно правильно відображають характер зміни повної кривої течії.

Неньютонівські рідини цілком задовільно можуть бути описані статичними моделями виду (одновимірне зрушення, $\dot{\gamma} > 0$):

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

де k, n – реологічні параметри, які є постійними і для даної рідини в деякому обмеженому діапазоні зміни швидкостей зрушення. Параметр k – міра консистенції рідини: чим менш рухливе середовище, тим k вище. Параметр n характеризує ступінь неньютонівської поведінки середовища. Чим сильніше n відрізняється від 1 (у більшу або меншу сторону), тим чіткіше проявляється аномалія в'язкості і нелінійність кривої течії.

У роботі [5] зазначається, що в реологічному рівнянні (4) розмірності змінних $\dot{\gamma}$ і τ фіксовані, а це означає, що для середовища із різним значенням параметра n параметр k змінюється не тільки кількісно, а й якісно. Таке заключення засвідчує, що достовірність рівняння справедливе лише в рамках конкретного середовища, а параметри n і k отримані і справедливі виключно в рамках виконаних експериментів.

Загальноприйнятого закону до врахування в'язких властивостей, незважаючи на низку пропозицій, немає. Очевидно, необхідно в кожному конкретному випадку для умов обробки технологічних середовищ коректно враховувати в'язкість як при малих, так і при помірних швидкостях дії на досліджуване середовище.

У роботі [9] пропонується універсальна реологічна модель, загальна для всіх рідин широкого класу (наприклад, неньютонівських, чисто в'язких), яка в принципі не є модифікацією ступеневого реологічного рівняння. При цьому неньютонівська в'язкість будь-яких текучих речовин у всьому можливому діапазоні зміни швидкостей зрушення змінюється від одного постійного значення μ_0 до іншого μ_{∞} причому $\mu_0 > \mu_{\infty}$ [7].

Універсальна реологічна модель для нелінійного в'язкого середовища формулюється у вигляді (α_{2n+1} – константи):

$$M = \frac{1}{2} - \frac{1}{n} \arctg \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{2n+1} \Gamma^{2n+1} \right\}, \quad (5)$$

де $M = \alpha \lg(\mu / \mu_0)$ – безрозмірна удавана в'язкість;



$$\Gamma = \beta \lg\left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_i}\right) + \lambda, \quad (6)$$

або

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_i \cdot 10^{\frac{\Gamma - \lambda}{\beta}}, \quad (7)$$

де Γ – безрозмірна швидкість зсуву; α, β, λ – реологічні параметри індивідуальних текучих речовин.

Лінеаризована модель (5) являє собою модифікацію ступеневого реологічного рівняння [8].

Проведений аналіз засвідчує наявність різних підходів до врахування в'язких властивостей середовищ, що знаходяться в умовах дії на них певних величин тисків та швидкостей. Варто зауважити, що основу розглянутих залежностей в тій чи іншій мірі визначаються прийнятою методикою вимірювання в'язкості, як відношення напруження до градієнту швидкості зрушення. У випадку обробки дисперсних середовищ в'язкість параметр, що суттєво впливає на енергетику технологічного середовища має бути прямо або опосередковано визначеною. Тому важливим аспектом досліджень являється не тільки обґрунтування та вибір аналітичної залежності, а і оцінка існуючих методів визначення в'язкості в конкретних технологічних операціях обробки дисперсного середовища та адаптації того чи іншого в'язкого чи в'язко-пластичного закону зміни реологічних властивостей.

Розглядаючи методи визначення в'язкості, варто зазначити, що відповідно до процесів ультразвукових кавітаційних методів обробки найближчим є застосування одного із розділів феноменологічної реології, в якій на відміну від мікрореології і макрореології, реологічні дослідження межують з фізикою і хімією, оскільки стан кавітуючого середовища нерозривно пов'язаний з параметрами цього процесу. Основна складність процесу точного визначення в'язкості полягає в тому, що класичний спосіб застосування віскозиметрів або пластометрів [8], передбачає можливість розділити властивості, що належать приладу і технологічному середовищу, а в умовах реальної зміни реологічних властивостей під дією ультразвуку, відобразити в експериментальному визначенні системою «прилад – середовище» практично не можливо. Для вирішення такої проблеми корисними є застосування теорії розпізнавання образів, статичної перевірки гіпотез та використання розрахункових формул і даних експерименту реального кавітаційного процесу.

За енергетичним підходом коефіцієнт в'язкості технологічного дисперсного середовища можна представити мірою дисипації механічної енергії або ступенем розсіювання тепломеханічної енергії кавітаційного середовища.

Прийнято вважати [10], що коефіцієнт згасання акустичних хвиль враховує: силу в'язкого опору між сусідніми частинками середовища, які володіють різними швидкостями; втрати, що виникають при всебічному стисканні середовища; втрати, що обумовлюють вплив теплопровідності.

Перша складова розсіювання енергії виникає із впливу внутрішнього тертя, що діє на частинки середовища, в якій розповсюджується акустична хвиля. В основі другої складової розсіювання енергії є релаксаційний процес, який впливає на поглинання хвиль в обмеженій полосі частот. Третя складова розсіювання енергії представляє собою перенесення тепла із області стискування в область розрідження акустичної хвилі.

Аналітичний вираз для визначення коефіцієнта згасання отримують шляхом розв'язання хвильового рівняння середовища з врахуванням розсіювання енергії [10], в якому комплексне хвильове число складається із дійсної і уявної частин, яка і дає можливість отримати коефіцієнт згасання:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c_{xв}^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \eta' + \chi \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (8)$$

де ω – частота, $c_{xв}$ – швидкість розповсюдження хвилі; ρ_0 – щільність; η, η' – коефіцієнти в'язкості зсуву та об'ємної в'язкості; χ – коефіцієнт теплопровідності; c_v, c_p – питома теплоємність газу при постійному об'єму та постійному тиску відповідно.

Ступінь впливу приведених складових визначається конкретними процесами обробки технологічного середовища.

Разом з тим залежність (8) в цілому відображає можливі втрати енергії, однак її реальне застосування є надто складним процесом і в розрахунках (внаслідок малого значення коефіцієнта χ у порівнянні з іншими) формула спрощується і, як правило, враховується тільки перша складова



розсіювання енергії. В цілому варто відмітити загальну залежність коефіцієнта згасання хвиль за яким поглинання акустичної хвилі змінюється пропорційно квадрату частоти і зворотно пропорційно швидкості її розповсюдження. Левова частка розсіювання енергії залежить від коефіцієнта зсувної в'язкості.

4. Висновки

1. Проведений аналіз врахування в'язких і в'язко-пластичних властивостей в дисперсних середовищах засвідчив наявність значних відмінностей у якісних та кількісних характеристиках, що приведені в реологічних моделях. Обумовлено це тим, що на даний час відсутній загальноприйнятий підхід до визначення та врахування в'язких і в'язко-пластичних властивостей в дисперсних середовищах.

2. Виявлено, що наявність в дисперсних середовищах в'язких властивостей суттєво впливає на інтенсифікацію процесів їхньої обробки.

3. Актуальною проблемою залишається дослідження та визначення енергетичних та силових параметрів інтенсифікації процесів обробки в'язких і в'язко-пластичних дисперсних середовищ. Для ультразвукових кавітаційних методів обробки доцільно використовувати методи феноменологічної реології та енергетичний підхід.

Список використаних джерел

1. Wood R. J. A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions / Wood R. J. , J. Lee, M. J. Bussemaker // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 38, 2017. – P. 351-370.
2. Луговской А. Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев – К.: Київський університет, 2007. – 245 с.
3. Хмелев В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев , Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007 – 400 с.
4. Bernyk I. Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in technological environment / I. Bernyk // *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – 2016. – Vol. 18. – № 3. – P. 3 – 13.
5. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей / З.П. Шульман – М.: Энергия, 1975. – 352с.
6. Овчинников П.Ф. Виброреология, П.Ф. Овчинников: Наукова думка, 1983. – 272с.
7. Смольский Б.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно-вязкопластичных сред. / Б.М. Смольский, З.П. Шульман, В.М. Гориславец – Минск: Наука и техника, 1970. – 250с.
8. Кузнецов О.А. Реология пищевых масс: Учебное пособие / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, Р.Ф. Сагитов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 106 с.
9. Стебновский С.В. Обобщенная реологическая модель кавитирующих конденсированных сред / С.В. Стебновский // *Прикладная механика и техническая физика*. – Т. 42. – №3, 2001. – С. 116–129.
10. Bernyk I. Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator / I. Bernyk, O. Luhovskyi // IX International Conference “Heavy Machinery-HM 2017”, Zlatibor, 28 July – 1 July 2017, A. 109 – 112.

References

- [1] Wood R. J. A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions / Wood R. J. , J. Lee, M. J. Bussemaker // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 38, 2017. – P. 351-370.
- [2] Luhovskoy A. F. Ul'trazvukova kavitatsiya v suchasnykh tekhnolohiyakh / A. F. Luhovskoy, N. V. Chukhraev - K. : Kyivskyi universytet, 2007. - 245 s.
- [3] Khmelev V.N. Ul'trazvukovi bahatofunktsional'ni ta spetsializovani aparaty dlya intensyfikatsiyi tekhnolohichnykh protsesiv u promyslovosti, sil's'kiy ta domashniy hospodarstvakh / V.N. Khmelev, H.V. Leonov, R.V. Barsukov, S.N. TSyhanok, A.V. Shalunov - Byysk: Yzd-vo Alt. hos. tekhn. Un-ta, 2007 - 400 s.



- [4] Bernyk I. Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in technological environment / I. Bernyk // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2016. – Vol. 18. – № 3. – P. 3 – 13.
- [5] Shul'man Z.P. Konvektyvnyy teplomassoperenos reolohichnykh skladnykh ridyn. / Z.P. Shul'man - M.: Enerhyya, 1975. - 352s.
- [6] Ovchynnykov P.F. Vybroreolohyya. / P.F. Ovchynnykov - K.: Naukova dumka, 1983. – 272s. Smol'skiy B.M. Reodynamika i teploobmin neliniyno-v'yazkoplastychnykh seredovysch / B.M. Smol's'kiy, Z.P. Shul'man, V.M. Horyslavets - Mynsk: Nauka i tekhnika, 1970. – 250s.
- [7] Kuznetsov O.A. Reolohyya pyshevykh mass: Uchebnoe posobyе / O.A. Kuznetsov, YE.V. Voloshyn, R.F. Sahitov. - Orenburh: HOU OHU, 2005. – 106 s.
- [8] Stebnovskiy S.V. Obshcheznaaya reolohyehskaya model' kavytyruyushchykh kondensirovannykh seredovysch. / S.V. Stebnovs'kiy // Prykladna mekhanika i tekhnichna fizyka. – T. 42. - №3, 2001. - S. 116-129.
- [9] Bernyk I. Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator / I. Bernyk, O. Luhovskiy // IX International Conference "Heavy Machinery-HM 2017", Zlatibor, 28 Jule – 1 July 2017, A. 109 – 112.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ИХ ИНТЕНСИВНОЙ ОБРАБОТКИ

В статье представлен анализ реологических моделей, которые описываются различными законами течения. Проведенный анализ свидетельствует о наличии различных подходов к учету вязких свойств сред, находящихся в условиях воздействия на них определенных величин давлений и скоростей. Предложено, кроме обоснования и выбора аналитической зависимости при определении вязкости, проводить адаптацию закона изменения реологических свойств в конкретных технологических условиях обработки, в том числе и для ультразвуковых технологий.

Ключевые слова: среда, вязкость, реологическая модель, диссипация, коэффициент затухания, ультразвуковая технология, интенсификация, энергетический подход.

Ф. 8. Табл. 1. Лит. 10.

INVESTIGATION OF THE VISCOSITY OF DISPERSED MEDIA UNDER CONDITIONS OF THEIR INTENSIVE PROCESSING

The article presents the analysis of rheological models, which are described by different laws of the current. The conducted analysis shows the existence of different approaches to taking into account the viscous properties of environments that are exposed to certain pressure and velocity quantities. In addition to substantiating and choosing an analytical dependence in determining the viscosity, it is proposed to adapt the law of change of rheological properties to specific technological conditions of processing, in particular for ultrasonic technologies.

Keywords: environment, viscosity, rheological model, dissipation, coefficient of extinction, ultrasonic technology, intensification, energy approach.

F. 8. Tabl. 1. Ref. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Берник Ірина Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Харчових технологій та мікробіології» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: iryna_bernyk@i.ua).

Берник Ирина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевых технологий и микробиологии» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: iryna_bernyk@i.ua).

Bernyk Iryna – PhD, Associate Professor of the Department of Food Technologies and Microbiology of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: iryna_bernyk@i.ua).