

УДК 504.064.47 : 536.24 : 620.92

С. Й. Ткаченко¹
Н. В. Паламарчук¹
Д. І. Денесяк¹

ТЕПЛОФІЗИЧНЕ ТЕСТУВАННЯ РЕОЛОГІЧНОГО ПОВОДЖЕННЯ СКЛАДНИХ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано метод теплофізичного тестування складних рідинних середовищ для оцінки характеру їх поведінки (ньютонівської чи неньютонівської) в умовах, близьких до реальних теплотехнологічних процесів. Проаналізовані експериментальні результати взаємозв'язку еквівалентів ефективної в'язкості та швидкості зсуву в складних сумішах в складних теплогідродинамічних умовах.

Обґрунтовано доцільність запропонованого методу теплофізичного тестування поведінки складних рідинних середовищ, які використовуються в теплотехнологічному обладнанні для переробки сільськогосподарської продукції, а також для утилізації відходів тваринницьких комплексів шляхом бродіння з виробництвом біогазу та добрив.

Проведено аналіз існуючих літературних джерел щодо визначення реологічних властивостей в'язких рідинних середовищ, теплофізичні та реологічні характеристики яких не вивчені або вивчені частково. Розглянуто віскозиметричні та реометричні методи тестування складних рідин. В умовах неізотермічної віскозиметрії намагаються виключити вплив ефекту саморозігріву на показники, що визначаються, або використовувати цей ефект для визначення реологічних параметрів в залежності від температури. Використовуючи результати ротаційної віскозиметрії, вводячи істотні спрощення, створюються математичні моделі теплових та гідродинамічних розрахунків. Для гідравлічних розрахунків такий підхід прийнятний на відміну від теплових. Для оцінки коефіцієнта тепловіддачі до складного полікомпонентного багатозфазного рідкого середовища, необхідно спочатку ідентифікувати його поведінку, характерну для ньютонівської рідини або структурованої неньютонівської.

Показано доцільність поєднання віскозиметричних та реометричних методів з теплофізичними для оцінки поведінки рідинних середовищ. Метод можна розцінювати як можливу альтернативу ротаційної віскозиметрії, оскільки він враховує напруження зсуву і градієнти швидкостей зсуву, які виникають від спільного впливу температурного перепаду і механічного збурення в середовищі. Використання цього методу в умовах, близьких до реальних технологічних, може прискорити впровадження результатів традиційних досліджень неньютонівських рідин у інженерну практику.

Ключові слова: теплообмін, ньютонівська рідина, неньютонівська рідина, реологічна крива, ефективна в'язкість, швидкість зсуву, віскозиметрія, теплофізичне тестування, реологічне поведіння, складне середовище.

Вступ

За умов проектування теплотехнологічного обладнання для переробки сільськогосподарських продуктів, для утилізації відходів тваринницьких комплексів шляхом зброджування з отриманням біогазу та добрив виникає проблема визначення інтенсивності теплообміну в складних рідинах та сумішах, теплофізичні і механічні властивості яких не вивчені та можуть змінюватися в залежності від їх передісторії [1]—[4]. Перелік таких сумішей великий. У багатьох випадках суміші являють собою структурні неньютонівські середовища. Технологія складається з набору процесів. Наприклад, в біореакторах тепломасообмінні процеси реалізуються в умовах перебігу біохімічних процесів. За умов ферментації, з виникненням бродіння, змінюються такі теплофізичні параметри: густина, теплоємність, теплопровідність, в'язкість. Конвективний теплообмін та реологічні властивості середовища взаємопов'язані. Тому важливо проводити дослідження і оцінювати інтенсивність теплообміну в умовах максимально наближених до реальних технологічних, тобто накладення процесів різної природи.

Результати дослідження

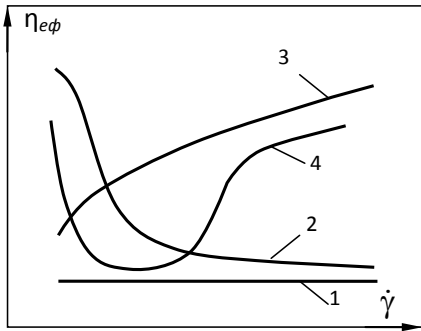


Рис. 1. Загальний вигляд реологічних кривих залежності ефективного в'язкості $\eta_{\text{эф}}$ від швидкості зсуву $\dot{\gamma}$: 1 — ньютонівська рідина; 2 — тиксотропна; 3 — дилатантна; 4 — тиксотропно-дилатантна

За умов дослідження механічних властивостей рідких середовищ методами ротаційної віскозиметрії отримані залежності ефективного в'язкості від швидкості зсуву для різних типів рідин (рис. 1), які дають уявлення про поведінку реології середовища.

Однак при цьому умови визначення реологічних характеристик у віскозиметрах та реометрах створюються штучно. Стабілізується температура, задається механічне збурення в рідині для створення однорідного в об'ємі режиму деформування зі строго контрольованими кінематичними і динамічними параметрами. Заданий режим підтримується протягом певного проміжку часу [5]—[7]. Відомі методи неізотермічної віскозиметрії, коли в робочому вузлі віскозиметра забезпечується рівномірність нагрівання рідини і слабкий теплообмін з навколишнім середовищем. Розігрів рідини відбувається тільки в часі та відсутня нерівномірність розподілу температур за об'ємом. Використовуючи принципи квазістаціонарної теорії неізотермічної течії, знаходять температурну залежність в'язкості i , варіюючи значеннями напруження зсуву, визначають залежність ефективного в'язкості від напруження $\eta_{\text{эф}}(\tau)$. В цьому випадку саморозігрів рідини, який є небажаним ефектом в ізотермічному способі, дозволяє отримати неперервну залежність в'язкості від температури [5]—[7].

Аналізуючи відомі методи ротаційної віскозиметрії можна зазначити, що вимірювання в'язкопружних властивостей проводиться в режимах усталеної ламінарної течії. У реальних теплотехнологічних процесах одночасно відбувається і рух (течія) середовища, і теплообмін. В об'ємі рідини виникають змінні в часі нерівномірний розподіл (поля) температур, швидкостей, концентрацій речовин, дотичних напружень. Зазначені умови складно відтворити у віскозиметрі. У реальному об'єкті має місце взаємозв'язок, яким не можна нехтувати: теплообмін впливає на реологічний стан середовища і навпаки. Сьогодні реологічні властивості визначаються в процесі тільки механічних впливів на досліджуване середовище.

У ротаційних віскозиметрах забезпечують високу однорідність поля напружень. Показано, що механічні руйнування мало впливають на значення теплопровідності та теплоємності, оскільки відхилення після руйнування значно менше відтворюваності вимірювань. Результати дослідження теплофізичних властивостей пластичних дисперсних систем показують, що для них зберігається лінійна залежність теплопровідності, густини і питомої теплоємності від температури аналогічно їх дисперсним середовищам. А значення властивостей теплопровідності, питомої теплоємності та густини вище у дисперсних систем, ніж у дисперсійних середовищ, причому визначальне значення має концентрація згущувача [8]. Для широкого класу пластичних дисперсних систем зберігається спільна з дисперсійними середовищами (ньютонівськими рідинами) закономірність зміни теплопровідності, питомої теплоємності від температури. Останнє є наслідком того, що перенесення теплоти зумовлене в основному молекулярним механізмом на відміну від перенесення імпульсу, де визначальне значення мають деформації структурного каркасу. Тому руйнування системи практично не впливає на теплофізичні властивості; незначною виявилася і роль зсувної анізотропії теплопровідності [8].

Використовуючи результати ротаційної віскозиметрії, вводячи істотні спрощення, створюються математичні моделі теплових і гідродинамічних розрахунків. Для гідравлічних розрахунків такий підхід прийнятний. Для впорядкованого руху і відсутності вихорів в потоці неньютонівської рідини з відомими теплофізичними властивостями намагаються вирішити питання визначення інтенсивності теплообміну аналітичними методами [6], [8], [11]. Там, де необхідно оцінити коефіцієнти тепловіддачі до складного полікомпонентного багатофазного рідкого середовища, теплофізичні властивості якого не вивчені, необхідно спочатку ідентифікувати його поведінку, характерну для ньютонівської рідини або структурованої неньютонівської. Для рідин з ефектами тиксотропії аналітичні розв'язання таких задач в літературі авторам невідомі.

Методами ротаційної віскозиметрії отримані експериментальні значення межі текучості τ_0 , коефіцієнта консистентності k , структурного показника n , густини ρ для гною великої рогатої худоби

(ВРХ), вологістю 91,8 і 95,2 %, і свиней, вологістю 89,3 і 92,6 % [12]. Так само було досліджено гній свиней, вологістю 91 %, густина якого 1030 кг/м^3 і отримані криві ефективної в'язкості гною [13]. В експериментах швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ змінюється від 0 до 1000 с^{-1} з поступовим збільшенням і зменшенням. Це дало можливість показати зменшення в'язкості гною після руйнування структури. Згідно з дослідженнями [12], [13], модель поведінки гною прийнята відповідно до рівняння $\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$. Температура суміші, за якої проводилися експерименти, в джерелах не вказана [12], [13].

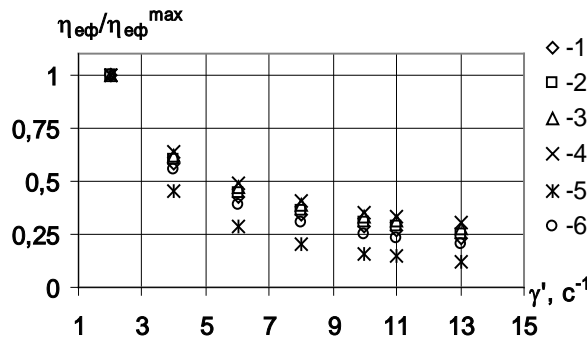


Рис. 2. Зміна відносної ефективної в'язкості від швидкості зсуву гною ВРХ: 1 — вологістю 91,8 %; 2 — вологістю 95,7 %; гною свиней: 3 — вологістю 89,3 %; 4 — вологістю 92 %; 5 — вологістю 91% до руйнування структури середовища; 6 — вологістю 91% після руйнування структури середовища

історія гною рис. 2, точки 1—4 в [12] не вказана.

Авторами проводилися експерименти з дослідження впливу передісторії та теплогідродинамічних умов на інтенсивність теплообміну в складних середовищах [1]—[4]. Для цього спеціально створено портативний експериментальний стенд, теплообмінна поверхня якого циліндричної форми і доступна для обслуговування (рис. 3).

Стенд обладнаний змінною пропелерною мішалкою $d_m = 0,058 \text{ м}$, з трьома лопатями, кут нахилу до горизонту кожної дорівнює 60° і дозволяє досліджувати процеси теплообміну в умовах природної і вимушеної конвекції. Співвідношення діаметрів мішалки і внутрішньої робочої порожнини установки $d_m/D_{\text{вн}} = 0,6$. Дві робочі порожнини: зовнішня — об'ємом V_1 , і внутрішня — об'ємом V_2 , розділені циліндричною поверхнею теплообміну. Об'єм робочої порожнини V_1 більше V_2 в 3,7 рази, висота циліндричної теплообмінної поверхні $H = 0,108 \text{ м}$ [1]—[4]. Діапазон регулювання частоти обертання мішалки 4...150 об/хв. У робочу порожнину V_1 (рис. 3) заливався гарячий теплоносій — вода. Об'єм V_2 заповнювався холодним теплоносієм (досліджуване рідке середовище). Рівень рідин в порожнинах V_1 і V_2 однаковий. Вимірювалися температури в п'яти точках в об'ємах V_1 і V_2 через певний проміжок часу. У гарячому теплоносії зонд з вимірювальними термопарами розташований на рівній відстані від стінок робочої порожнини V_1 , в досліджуваній рідині в об'ємі V_2 — біля валу мішалки, не перешкоджаючи вільному його обертанню. У межах однієї серії вимірювань число обертів мішалки не змінювалось.

Фіксування температур серії експериментів закінчувалося з досягненням середнього температурного напору між теплоносіями $\Delta t = 3...5^\circ\text{C}$. Коефіцієнти тепловіддачі до досліджуваного рідкого середовища $\alpha_2^{\text{експ}}$ визначалися через коефіцієнти теплопередачі k в системі. Взято до уваги, що коефіцієнти тепловіддачі від стінки до рідини, що нагріває, α_1 більше $\alpha_2^{\text{експ}}$ в 1,5...10 разів.

З використанням експериментальних даних [12], [13] виконано зіставлення реологічних кривих для гною свиней та ВРХ в координатах відносна в'язкість $\eta_{\text{еф}}/\eta_{\text{еф}}^{\text{max}}$ — швидкість зсуву $\dot{\gamma}$. Це дозволило показати ідентичність характеру зміни ефективної в'язкості зі швидкістю зсуву $\eta_{\text{еф}}(\dot{\gamma})$ (рис. 1, крива 2) та означає, що поведінка досліджуваних середовищ в заданому діапазоні параметрів відповідає поведінці одного типу неньютонівських рідин.

Порівняння розташування точок на рис. 2 показує, що відносна ефективна в'язкість гною зі спочатку незруйнованою структурою (точка 5) більшою мірою зменшується, ніж гною зі спочатку зруйнованою структурою (точка 6). Перед-

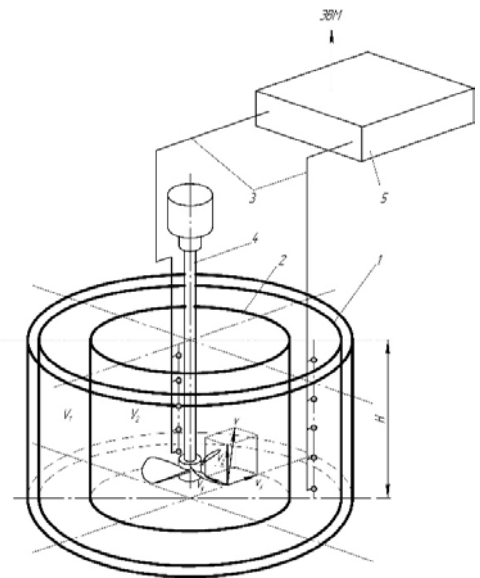


Рис. 3. Установка для дослідження теплообміну за умов природної і вимушеної конвекції: 1, 2 — зовнішня і внутрішня посудина; 3 — термопари; 4 — пропелерна мішалка; 5 — пристрій збору і попередньої обробки сигналів, що надходять від датчиків вимірювання температури

Методика обробки експериментальних даних викладена в [1]—[4]. Під дією пропелерної мішалки рідина здійснює складний рух у внутрішній порожнині (рис. 3), вимушений рух супроводжується вільною конвекцією. Авторами за характерну швидкість рідини взята лінійна швидкість точки на кінці лопаті пропелера $\bar{w} = \pi N d_M / 60$, а величина $(\bar{\gamma}) = (\bar{\dot{\gamma}}) = \bar{w} / [0,5(D_{\text{вн}} - d_M)]$ авторами трактується як еквівалент швидкості зсуву для умов конкретної установки (див. рис. 3) і досліджуваного діапазону параметрів на ній (табл.). З таблиці випливає, що в умовах тарування стенду певна нестационарність процесу не позначилася на структурі критеріального рівняння характерного для стаціонарних умов теплообміну.

Характеристика експериментальних результатів дослідження взаємозв'язку еквівалентів ефективної в'язкості і швидкості зсуву, проведених на базовому експериментальному стенді (рис. 3)

№ п/п	Гній	Стан гною	Вологість, W, %	Середня температура гною \bar{t}_2 , °C	Температурний перепад між гарячим і холодним теплоносіями $\bar{\Delta t}$, °C	Номер точки на рис. 6	Поведінка середовища
1	Свиней	Бродіння	94	40	8,5...14	1	нН
2	Свиней	Бродіння	94	35	8,5...14	2	нН
3	ВРХ	Бродіння	92	40	8,5...14	3	нН
4	ВРХ	Бродіння	92	35	8,5...14	4	нН
5	ВРХ	Бродіння	92	30	8,5...14	5	нН
6	Свиней	Перероджений	90	40	8,5...14	6	Н
7	Свиней	Перероджений	90	35	16...20	7	нН
8	ВРХ	Свіжий	94	35	8...15	8	Н

Примітка. нН — в діапазоні параметрів експерименту проявляється поведінка неньютонівської рідини; Н — в діапазоні параметрів експерименту проявляється поведінка ньютонівської рідини.

Згідно з [8]—[11], за використання поняття ефективної в'язкості теплообмін в неньютонівських і ньютонівських рідинах описується критеріальними рівняннями однакової структури. В [8] останнє пояснюється тим, що «завдання вибору реологічної моделі дещо спрощується, оскільки за стаціонарного руху в круглих трубах роль пружних властивостей відносно невелика. Останнє дозволяє покласти в основу модель узагальненої ньютонівської рідини».

За результатами попереднього тарування отримані критеріальні рівняння, що описують інтенсивність теплообміну в кожній з робочих порожнин. Для внутрішньої порожнини в реструктуризованому критеріальному рівнянні, яке названо базовим, враховується вільна і вимушена конвекція [2], [3]

$$\alpha_2 = 0,0549 K \Phi B_6 \underbrace{\left[\frac{-0,59}{\bar{w}} \left(g \bar{\Delta t}_6 \right)^{0,1} \frac{H^{0,3}}{(2\delta)^{0,41}} \right]}_{P_{62}} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)_6^{0,25}, \quad (1)$$

де
$$K \Phi B_6 = \underbrace{C_p^{0,43} \cdot \rho^{0,43} \cdot \beta^{0,1} \cdot \lambda^{0,57} \cdot \nu^{-0,359}}_{P_1}; \quad (2)$$

$$P_1 = C_p^{0,43} \rho^{0,43} \beta^{0,1} \lambda^{0,57}, \quad (3)$$

де $\bar{\Delta t}_6 = (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)$; \bar{t}_1 і \bar{t}_2 — усереднена температура гарячого теплоносія і досліджуваного рідкого середовища, °C [1]; $2\delta = D_{\text{вн}} - d_M$ — визначальний лінійний розмір для вимушеної конвекції, м; H — визначальний лінійний розмір в умовах природної конвекції, м; $\bar{w} = \pi n d_M / 60$ — умовна характерна швидкість руху рідини, м/с; N — частота обертання мішалки, об/хв; α_2 — коефіцієнт тепловіддачі від теплообмінної поверхні до досліджуваного рідкого середовища, Вт/(м²К); Pr_p — критерій Прандтля для рідини, визначений за температурою рідини, $Pr_p = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$; Pr_{ct} — критерій Прандтля для рідини, визначений за температурою стінки; β — коефіцієнт температурного розши-

рення рідкого середовища, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; λ — теплопровідність рідкого середовища, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ν — кінематична в'язкість рідкого середовища, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ — густина рідкого середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p — питома теплоємність рідкого середовища, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; g — прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; КФВ_6 — базовий комплекс фізичних властивостей. Поправка на напрямок теплообміну $(Pr_p/Pr_{ст})_6^{0,25}$ визначалася за спеціально розробленим методом з використанням рідин і сумішей, теплофізичні властивості яких невідомі [2], [3].

Якщо експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки до досліджуваного рідкого середовища $\alpha_2^{\text{експ}}$, то експериментальне значення комплексу фізичних властивостей

$$\text{ЕКФВ}_6 = \frac{\alpha_2^{\text{експ}}}{0,0549 \underbrace{\left[w^{-0,59} (g \cdot \Delta t_6)^{0,1} \frac{H^{0,3}}{2\delta^{0,41}} \right]}_{\Pi_{62}} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)_6^{0,25}}. \quad (4)$$

Аналіз чисельними методами залежностей (1) і (4) в досліджуваному діапазоні зміни температур та $\dot{\gamma}$ показав, що ступінь зміни комплексу параметрів P_1 істотно менший ступеня зміни $\nu^{-0,36}$, що узгоджується з [8].

На рис. 4 подано підтвердження вищесказаного на прикладі рідких середовищ, теплофізичні властивості яких вивчені і наводяться в довідковій літературі [2], [3].

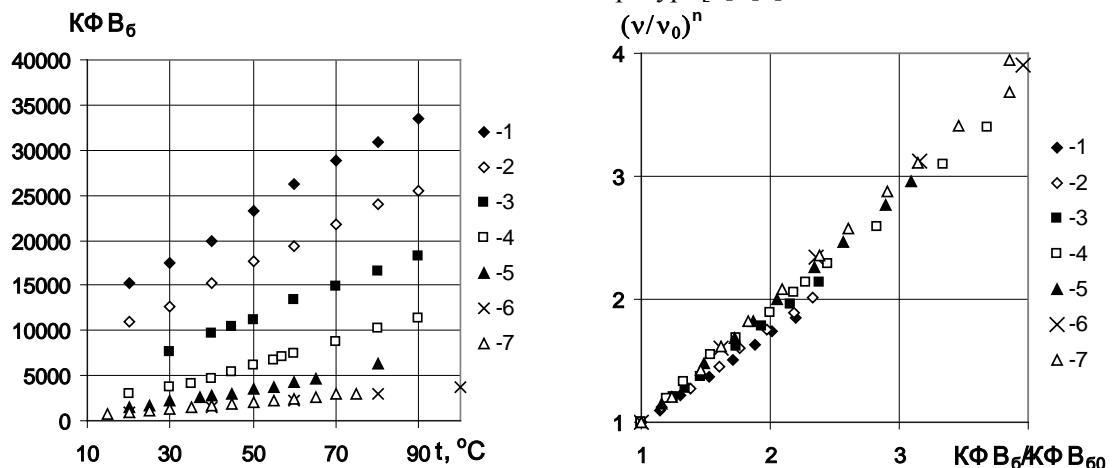


Рис. 4. Розрахункові залежності комплексу фізичних властивостей КФВ і його складових від температури для рідких середовищ: цукровий розчин з масовими концентраціями: 1 — 40 %; 2 — 50 %; 3 — 60 %; 4 — 70 %; 5 — гліцерин безводний; 6 — машинне масло; 7 — мазут марки $\Phi 12$

За результатами аналізу, наприклад, рис. 4б, прийнято рішення залежність $\eta_{\text{еф}} = f(\dot{\gamma})$ з метою якісного аналізу реологічної поведінки рідини (розчину, суміші) замінити на:

$$(\text{КФВ}_6)^{(1/n)} / (\text{КФВ}_6)_0^{(1/n)} = f(\bar{\gamma}) \quad \text{— коли відомі теплофізичні властивості;}$$

$$(\text{КФВ}_6)^{(1/n)} / (\text{КФВ}_6)_{\text{max}}^{(1/n)} = f(\bar{\gamma}) \quad \text{— коли не відомі,}$$

де $n = -0,36$ — показник степеня біля P_1 (3). В подальшому $(\text{КФВ}_6)^{(1/n)} / (\text{КФВ}_6)_{\text{max}}^{(1/n)}$ трактуватиметься як відносний еквівалент ефективної в'язкості.

В експериментах використовувалися складні рідинні середовища з невідомими теплофізичними та реологічними властивостями: безпідстилковий гній великої рогатої худоби з масовою вологістю 92 % і 94 % і свиней, вологістю 90 % і 94 %, свіжий та в стані бродіння; сироватка з вмістом сухих речовин 5...12 % свіжа та в стані бродіння. А також рідкі середовища з відомими теплофізичними властивостями: гліцерин-дистилат, цукровий розчин з масовою концентрацією 50 %. Середній температурний перепад між теплообмінною поверхнею і експериментальним середовищем змінювався в діапазоні $\Delta t = 8...20^{\circ}\text{C}$.

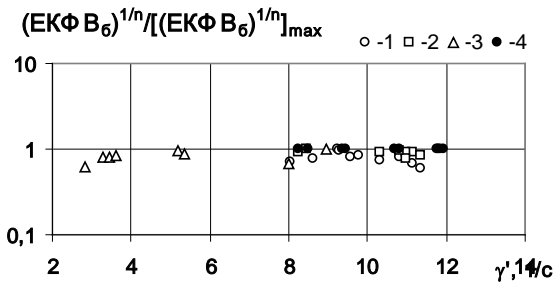


Рис. 5. Експериментальні результати еквіваленту ефективної в'язкості за умов різних значень умовної швидкості зсуву ньютонівської рідини: 1 — сироватки в стані зброджування із середньою температурою 45 °С; температурний напір між гарячим і холодним теплоносієм в базовому експерименті $\overline{\Delta t_6} = 5...18$ °С; 2 — свіжої сироватки з середньою температурою 40 °С, $\overline{\Delta t_6} = 5...18$ °С; 3 — цукрового розчину масовою концентрацією 50 % з середньою температурою 40 °С, $\overline{\Delta t_6} = 8...9,5$ °С; 4 — гліцерину-дистиляту з середньою температурою 45 та 70 °С, $\overline{\Delta t_6} = 12...20$ °С

Гній, використаний в аналізованих експериментах, мав різний хімічний та гранулометричний склад, структуру, її стан, співвідношення рідкої, твердої і газоподібної фаз. Однак, результати експериментів на рис. 2 авторів [12], [13] якісно узгоджуються між собою і з отриманими експериментальними залежностями (рис. 6), що і є підтвердженням доцільності запропонованого авторами підходу.

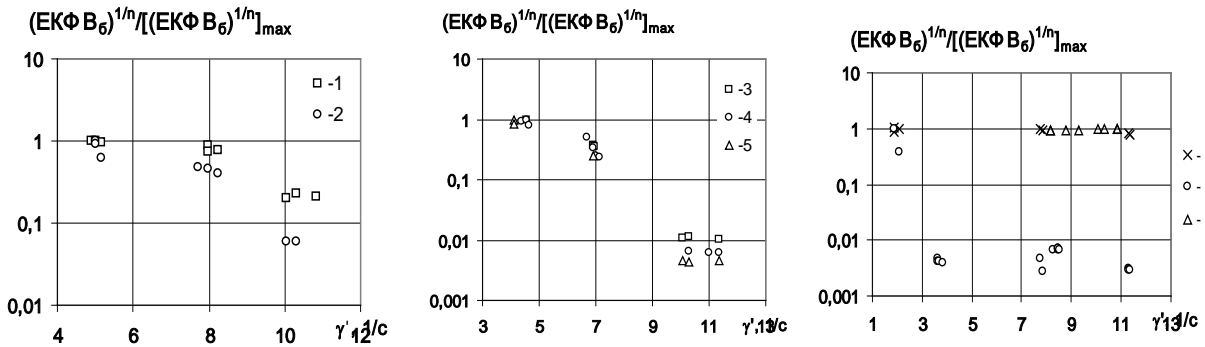


Рис. 6. Експериментальні результати взаємозв'язку еквівалентної ефективної в'язкості та швидкості зсуву в складних сумішах: 1, 2 — гній свиней на стадії бродіння; 3, 4, 5 — гній ВРХ на стадії бродіння; 6, 7 — зброжений; 8 — свіжий ВРХ

Таким чином, метод теплофізичного тестування реологічного поведіння складних рідинних середовищ можна розцінювати як можливу альтернативу, в окремих випадках, ротаційної віскозиметрії. Переваги його в тому, що за допомогою процесу теплообміну враховуються такі напруження зсуву і градієнти швидкостей зсуву, які виникають від спільного впливу температурного перепаду та механічного збурення (впливу) в середовищі.

Запропонований експериментальний стенд і метод багатоваріантних досліджень процесу теплообміну дає можливість отримувати уявлення про реологічні перетворення в суміші та визначати порядок величини коефіцієнта тепловіддачі в різних умовах теплообміну.

В основу тестування покладена встановлена залежність інтенсивності теплообміну від ступеня руйнування структури та аналіз критеріальних рівнянь.

Висновки

На сьогодні не відомі методи і способи визначення реологічної поведінки рідини, які проводяться теплофізичними методами. У неізотермічній віскозиметрії намагаються виключити вплив саморозігріву на показники, які визначаються або використовувати цей ефект для визначення температурних залежностей реологічних параметрів.

Перспективу розвитку запропонованого методу автори вбачають у використанні його для оцінки інтенсивності теплообміну в складних середовищах, коли доцільно віскозиметричні і реометричні методи поєднувати з теплофізичними для встановлення характеру поведінки рідинних середовищ

На рис. 5 показані результати експерименту на установці (рис 3) для рідинних середовищ з відомими теплофізичними властивостями (рис. 5, точки 3, 4) і невідомими (рис. 5, точки 1, 2).

Розташування точок на рис. 5 показує, що поведінка досліджуваних середовищ близька до поведінки ньютонівських рідин.

Експериментальні дані (див. рис. 5, 6)

$(KФВ_б)^{(1/n)} / (KФВ_б)_{max}^{(1/n)} = f(\overline{\gamma})$, виявилися ідентичними реологічним залежностям ефективної в'язкості від швидкості зсуву для ньютонівських і псевдопластичних рідин (див. рис. 1, крива 1 і 2). Результати (рис. 6) якісно узгоджуються з кривими течії безпідстилкового гною ВРХ і свиней, отриманими способами ротаційної віскозиметрії [12]—[14] (див. рис. 2).

На різну поведінку гною свиней (рис 5, точки 6, 7), на думку авторів, вплинув різний температурний напір в експерименті.

(ньютонівських або неньютонівських) в умовах близьких до реальних теплотехнологічних процесів.

Запропонований підхід повинен, на думку авторів, прискорити впровадження напрацювань результатів традиційних досліджень неньютонівських рідин в розрахункову практику інженерних задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. И. Ткаченко, Н. В. Пишенина и Т. Ю. Румянцева, «Исследование процессов теплообмена в реонестабильных смесях органического происхождения.» *Инженерно-физический журнал*, том 87, № 3, с. 700-707, 2014.
- [2] Н. В. Пишенина, «Теплообмен в сложных смесях в условиях естественной конвекции.» *Современные технологии, материалы и конструкции в строительстве. Научно-технический сборник*, № 2, с. 124-131, 2011.
- [3] С. И. Ткаченко и Н. В. Пишенина, «Метод определения интенсивности теплообмена в реонестабильных смесях.» *Современные технологии, материалы и конструкции в строительстве. Научно-технический сборник*, № 2, с. 78-87, 2012.
- [4] С. И. Ткаченко, «Методы и средства снижения неопределенностей оценки интенсивности теплообмена в сложных смесях», Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Научно-технический сборник. Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, № 12(1055), с. 116-126, 2014.
- [5] А. Я. Малкин и А. Е. Чалых, *Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения*. Москва: Химия, 1979.
- [6] Ю. Е. Пивинский, *Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем*. Санкт-Петербург, 2001.
- [7] П. Ф. Овчинников, Н. В. Круглицкий и Н. В. Михайлов, *Реология тиксотропных систем*. Киев: Наукова думка, 1972.
- [8] Г. Б. Фройштетер, С. Ю. Данилевич, и Н. В. Радионова, *Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах*. Киев: Наукова думка, 1990.
- [9] С. И. Кузьмин, «Теплообмен и трение в реологических системах с учетом переменной вязкости жидкости.» дис. канд. техн. наук : спец. 01.04.14, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, 2005.
- [10] С. С. Кутателадзе, Е. М. Хабахпашева, В. Б. Лемберский и В. И. Попов, *Некоторые вопросы гидродинамики и теплообмена структурно-вязких сред. Тепло- и массообмен в неньютоновских жидкостях*. Москва: Энергия, 1968.
- [11] З. Ю. Шульман, *Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей*. Москва: Энергия, 1975.
- [12] А. А. Семеновский, *Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения*. Москва: Колос, 1978.
- [13] А. Н. Тропин «Повышение эффективности работы самотечной системы удаления навоза путем оптимизации ее конструктивных и технологических параметров», автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург-Павловск: Государственное научное учреждение Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии, 2011.
- [14] В. А. Кузин, и А. Н. Ковальчук, «Выбор элементов поточной технологической линии удаления навоза для фермерских хозяйств.» *Материалы международной заочной научной конференции 15 октября 2010 г. «Проблемы современной аграрной науки»*, Красноярский государственный аграрный университет. Красноярск, 2011.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.04.2018

Ткаченко Станіслав Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Паламарчук Надія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: pisheniniv@mail.ru ;

Денесяк Дмитро Іванович — аспірант кафедри теплоенергетики, e-mail: doc13energee@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. Y. Tkachenko¹
N. V. Palamarchuk¹
D. I. Denesiak¹

Thermophysical testing of flow behaviors of composite liquid media

¹Vinnitsia National Technical University

The method of thermophysical testing of complex liquid media is proposed to assess the nature of their behavior (Newtonian or Non-Newtonian) in conditions close to real heat engineering processes. The experimental results of the interconnection of the equivalents of effective viscosity and shear rate in complex mixtures under complex thermodynamic conditions are analyzed.

The expediency of the proposed method of thermophysical testing of the handling of complex liquid media used in heat technology equipment for the processing of agricultural products, as well as for the utilization of animal waste by fermentation with the production of biogas and fertilizers, is substantiated.

The analysis of the existing literary information on the determination of rheological properties of viscous fluid media, the thermophysical and rheological characteristics of which have not been studied or studied in part. Viscometric and rheometric methods of testing complex liquids are considered. In nonisothermal viscometry, we try to exclude the effect of self-heating on the indicators that are determined or to use this effect to determine the rheological parameters, depending on the temperature. Using the results of rotational viscometry, introducing significant simplifications, mathematical models of thermal and hydrodynamic calculations are created. For hydraulic calculations, this approach is acceptable unlike thermal. To esti-

mate the coefficient of heat transfer to a complex poly-component multiphase liquid medium, it is necessary to first identify its behavior — characteristic of Newtonian fluid or structured non-Newtonian.

It is shown the expediency of combining viscosimetric and rheometric methods with thermophysical methods for evaluation of liquid media behavior. The method can be regarded as a possible alternative to rotary viscometry, since it takes into account the shear stresses and gradients of shear rates that arise from the joint effect of temperature difference and mechanical perturbation in the medium. The use of this method in conditions close to the actual technological can accelerate the introduction of the results of traditional studies of non-Newtonian fluids into engineering practice.

Keywords: heat exchange, Newtonian fluid, non-Newtonian fluid, rheological curve, effective viscosity, shear rate, viscosimetry, thermophysical testing, rheological behavior, complex environment.

Tkachenko Stanislav Yo. — Dc. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Palamarchuk Nadiia V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: pisheniniv@mail.ru ;

Denesiak Dmytro I. — Post-Graduate Student of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: doc13energee@gmail.com

С. И. Ткаченко¹
Н. В. Паламарчук¹
Д. И. Денесяк¹

Теплофизическое тестирование реологического поведения сложных жидких сред

¹Вінницький національний технічний університет

Предложен метод теплофизического тестирования сложных жидкостных сред для оценки характера их поведения (ньютоновской или неньютоновской) в условиях, близких к реальным теплотехнологическим процессам. Проанализированы экспериментальные результаты взаимосвязи эквивалентов эффективной вязкости и скорости сдвига в сложных смесях в сложных теплогидродинамических условиях.

Обоснована целесообразность предложенного метода теплофизического тестирования поведения сложных жидкостных сред, используемых в теплотехнологическом оборудовании для переработки сельскохозяйственной продукции, а также для утилизации отходов животноводческих комплексов путем брожения с производством биогаза и удобрений.

Проведен анализ существующих литературных источников по определению реологических свойств вязких жидких сред, теплофизические и реологические характеристики которых не изучены или изучены частично. Рассмотрены вискозиметрические и реометрические методы тестирования сложных жидкостей. В условиях неизотермической вискозиметрии пытаются исключить влияние эффекта саморазогрева на определяемые показатели или использовать этот эффект для определения реологических параметров в зависимости от температуры. Используя результаты ротационной вискозиметрии, вводя существенные упрощения, создаются математические модели тепловых и гидродинамических расчетов. Для гидравлических расчетов такой подход приемлем в отличие от тепловых. Для оценки коэффициента теплоотдачи к сложной поликомпонентной многофазной жидкой среде, необходимо сначала идентифицировать её поведение, характерное для ньютоновской жидкости или структурированной неньютоновской.

Показана целесообразность сочетания вискозиметрических и реометрических методов с теплофизическими для оценки поведения жидкостных сред. Метод можно расценивать как возможную альтернативу ротационной вискозиметрии, поскольку он учитывает напряжения сдвига и градиенты скоростей сдвига, которые возникают от совместного влияния температурного перепада и механического возмущения в среде. Использование предложенного метода в условиях близких к реальным технологическим может ускорить внедрение результатов традиционных исследований неньютоновских жидкостей в инженерную практику.

Ключевые слова: теплообмен, ньютоновская жидкость, неньютоновская жидкость, реологическая кривая, эффективная вязкость, скорость сдвига, вискозиметрия, теплофизическое тестирование, реологическое поведение, сложная среда.

Ткаченко Станислав Иосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Паламарчук Надежда Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры теплоэнергетики, e-mail: pisheniniv@mail.ru ;

Денесяк Дмитрий Иванович — аспирант кафедры теплоэнергетики, e-mail: doc13energee@gmail.com