

УДК 631.331

© С.М. Хомич.; І.Є. Цизь, к.т.н.; М.І. Коробка
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ ОРГАНІЧНОГО САПРОПЕЛЮ

У статті наведені методика та експериментальні дослідження коефіцієнта динамічної в'язкості органічного сапропелю. Проведено аналіз отриманих результатів.

САПРОПЕЛЬ, ВОЛОГІСТЬ, В'ЯЗКІСТЬ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ШВИДКІСТЬ ШАРІВ, ТИСК, УСТАНОВКА.

Постановка проблеми. Органічні сапропелі характеризуються специфічними властивостями, які потребують спеціальних методів дослідження та індивідуальної оцінки. Їх поклади є неоднорідними для різних родовищ та за глибиною залягання. У природному стані сапропель є органо-мінеральною дисперсією, яка за класифікацією дисперсних систем належить до суспензій. У даній системі дисперсним середовищем є вода, а дисперсною фазою – тверді органо-мінеральні частинки. За класифікацією в'язких рідин сапропель слід віднести до не ньютонівських. Для даних рідин специфічною властивістю являється в'язкість яка залежить від зміни градієнта швидкості зсуву шарів. У той же час в'язкість є основною реологічною властивістю даного матеріалу, яка впливає на якість роботи пневматичних засобів для добування, а отже і використовується при розрахунках і моделюванні процесів. У зв'язку з цим, визначення коефіцієнта динамічної в'язкості займає важливе значення в системі експериментальних факторів під час реалізації математичної моделі наведеної в [2] засобу для добування сапропелю [1].

Аналіз останніх досліджень. У відомих дослідженнях в'язкості сапропелів, тобто властивості чинити опір відносному зміщенню його шарів використовували віскозиметр ротаційного типу РВ-8 [3, 4]. Результати досліджень засвідчують, що найвищою в'язкістю володіють органічні сапропелі, які за відносної вологості 92% та температурі +15 °С досягають 80 П (8 Па·с), кремнеземисті відповідно не більше 36 П, а карбонатні лише 24 П. Із збільшенням вмісту сухої речовини в'язкість різко зростає і може досягати 10000 П [3, 5].

Характерною особливістю сапропелів є зменшення в'язкості при збільшенні швидкості зсуву. Так для органічного сапропелю за швидкості зсуву 0,06 м/с в'язкість складає 94 П, а для швидкості

0,39 м/с – 26,6 П. В'язкість сапропелю, зменшується із збільшенням температури. Збільшення температури від 12 до 20 °С приводить до зменшення в'язкості для органічних сапропелів у 1,3 і для кремнеземних в 1,1 рази [3, 5]. Але наведені дослідження стосуються сапропелів добутих із родовищ Білорусі та не розкривають впливу гідростатичного тиску і швидкості зсуву на коефіцієнт в'язкості.

Мета роботи. З метою практичного використання математичної моделі, отриманої у [2] дослідити в'язкість органічного сапропелю, а також встановити закономірності впливу на даний показник гідростатичного тиску верхніх шарів покладів та швидкості деформації.

Результати досліджень. Методика визначення в'язкості органічного сапропелю розроблена на основі відомих методик для ротатійного методу визначення в'язкості [3, 4, 5] із урахуванням особливості даного матеріалу та умов його добування.

Для проведення досліджень використовували сапропель органічного типу добутий з оз. Зяцьке. Також була розроблена та виготовлена лабораторна установка схема та фото якої подано на рис. 1.

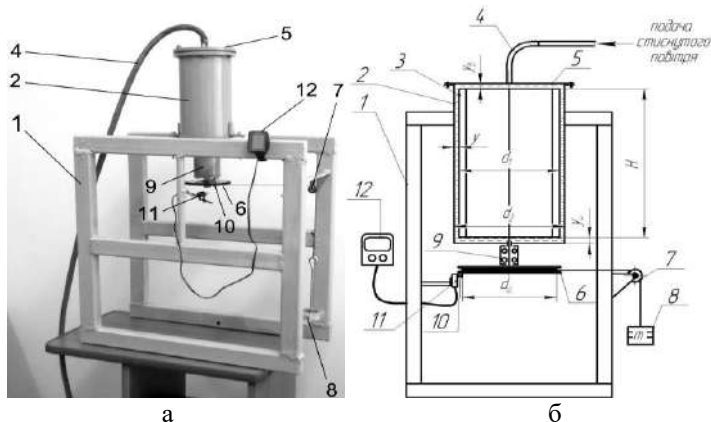


Рис. 1 – Установка для дослідження в'язкості сапропелю: а – фото; б – схема; 1 – рама; 2 – зовнішній циліндр; 3 – внутрішній циліндр; 4 – трубопровід подачі стиснутого повітря; 5 – кришка зовнішнього циліндра; 6 – привідний шків; 7 – блок; 8 – вантаж; 9 – блок підшипників; 10 – постійний магніт; 11 – давач; 12 – вимірювальний прилад

Основою даної установки є зовнішній 2 та внутрішній 3 циліндри. У кільцевому проміжку між цими циліндрами

розташовується досліджуваний матеріал, а герметизація зовнішнього циліндра 2 забезпечується кришкою 5. Обертний рух внутрішньому циліндру 3 надається через шків 6 та блок 7 вантажами 8. Швидкість обертання внутрішнього циліндра 3 регулювалась масою вантажів 8, що вкладались. Вал внутрішнього циліндрі 3 обертається у підшипниковій опорі 9. Для реєстрації частоти обертання внутрішнього циліндра 3 на шківу 6 закріплений постійний магніт 10, а на рамі 1 – давач 11. Дачач 11 у свою чергу з'єднаний провідником із вимірювальним приладом, який фіксує числове значення максимальної частоти обертання внутрішнього циліндра 3.

На основі закону Ньютона для рідинного тертя стосовно конструкції вищенаведеного ротаційного приладу можна записати вираз для визначення дотичних напружень τ на бічних поверхнях рухомого циліндра 3

$$\tau = \eta \cdot \left(\frac{du}{dy} + \frac{du_g}{dy_g} + \frac{du_n}{dy_n} \right), \quad (1)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості сапропелю, Па·с; du , du_g , du_n – лінійна швидкість елементарного шару сапропелю відповідно у зазорі між бічною поверхнею рухомого циліндра, верхньою і нижньою його основами та зовнішнім циліндром, м/с; dy , dy_g , dy_n – відстань за нормаллю між сусідніми елементарними шарами сапропелю відповідно у зазорі між бічною поверхнею рухомого циліндра, верхньою і нижньою його основами та зовнішнім циліндром, м.

Оскільки, можна вважати, що швидкість шарів у зазорі між циліндрами змінюється за лінійним законом то вираз (1) набуде вигляду:

$$\tau = \eta \cdot \left(\frac{u}{y} + \frac{u_g}{y_g} + \frac{u_n}{y_n} \right). \quad (2)$$

Прийнявши трикутний розподіл напружень по площі верхньої та нижньої основ рухомого циліндра та рівномірний розподіл по бічній його поверхні, величину крутного моменту $M_{кр}$, яку необхідно прикласти до вала рухомого циліндра, можна визначити за формулою

$$M_{кр} = \tau \cdot \pi \cdot d_1 \cdot H \cdot \left(\frac{d_1}{2} \right) + 2 \cdot \tau \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left(\frac{d_1}{2} \right), \quad (3)$$

де d_1 та H – відповідно зовнішній діаметр та висота внутрішнього циліндрі, м.

Звідки:

$$\tau = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot H \cdot \left(1 + \frac{d_1}{3 \cdot H}\right)}. \quad (4)$$

Прийнявши трикутний розподіл швидкості по площі верхньої та нижньої основ рухомого циліндра та рівномірний розподіл по бічній його поверхні запишемо

$$u = \omega \cdot \frac{d_1}{2}; \quad (5)$$

$$u_s = u_n = \omega \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{d_1}{2} = \omega \cdot \frac{d_1}{3}, \quad (6)$$

де ω – кутова швидкість обертання вала внутрішнього циліндра, c^{-1} .

Із виразу (3) з урахуванням того, що $y = (d_2 - d_1)/2$ (тут d_2 – внутрішній діаметр зовнішнього циліндра, м) та виразів (4), (5), (6) отримаємо

$$\eta = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot H \cdot \left(1 + \frac{d_1}{3 \cdot H}\right) \left(\frac{\omega \cdot d_1}{d_2 - d_1} + \frac{\omega \cdot d_1}{3} \cdot \left(\frac{1}{y_s} + \frac{1}{y_n}\right)\right)}. \quad (7)$$

Оскільки, з іншої сторони

$$M_{кр} = m \cdot g \cdot d_{ш} / 2, \quad (8)$$

де m – сумарна маса вантажів під дією яких обертається внутрішній циліндр, кг; $d_{ш}$ – діаметр шківу приводу внутрішнього циліндра.

Враховавши, що $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$, де n – частота обертання вала внутрішнього циліндра (об/с) та (8) із (7) отримаємо:

$$\eta = \frac{m \cdot g \cdot d_{ш}}{2 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot d_1^3 \cdot H \cdot \left(1 + \frac{d_1}{3 \cdot H}\right) \left(\frac{1}{d_2 - d_1} + \frac{1}{3 \cdot y_s} + \frac{1}{3 \cdot y_n}\right)}. \quad (9)$$

Для розрахунку коефіцієнта динамічної в'язкості за формулою (9) проводили експериментальні дослідження на установці (рис. 1, а) у наступній послідовності.

Перед проведенням експерименту установку встановлювали горизонтально та шляхом вкладання вантажів досягали компенсації опору обертанню внутрішнього циліндра від підшипників та ущільнення.

Далі внутрішній простір приладу між рухомим та нерухомим циліндрами заповнювали досліджуваним зразком сапропелю. Заповнення здійснювали совочком, забезпечуючи утворення

рівномірної цівки матеріалу. При цьому кромка совочка знаходилась на висоті 5-10 мм над верхнім отвором зовнішнього циліндра. Для знімання надлишків матеріалу та вирівнювання його вільної поверхні застосовували ніж-планувальник. Герметизацію зовнішнього циліндра проводили шляхом встановлення кришки та загвинчуванням болтів.

Після цього звільняли привідний шків 6 установки від фіксатора та поступово збільшували масу вантажу 8 до тих пір поки не починався його вертикальний рух. При цьому кожна ступінь вантажу витримувалась протягом 3 с. Частота обертання вала рухомого циліндрі 3 визначалась за показами вимірювального приладу 12.

Далі обертаючи привідний шків 6 повертали рухомий циліндр 3 у вихідне положення та фіксували. Тоді збільшували масу вантажів на 0,3 кг і звільняли шків 6 від фіксатора та визначали частоту обертання вала рухомого циліндрі 3. Експеримент повторювали ще тричі збільшуючи щоразу масу вантажу на 0,3 кг. Для реалізації повторюваності експерименту внутрішній простір приладу між рухомим та нерухомим циліндрами звільняли від сапропелю, промивали та висушували із наступним заповненням свіжим зразком матеріалу.

Для дослідження впливу тиску верхніх шарів сапропелю за товщиною покладів на його в'язкість реалізовували експеримент за описаною вище методикою лише з тією різницею, що після герметизації зовнішнього циліндра 2 вмикалась подача стисненого повітря та створювався надлишковий тиск на досліджуваний зразок матеріалу. Величина тиску за якою здійснювались дослідження складала 50, 100, 150 та 200 кПа, що визначалась глибиною залягання покладів 5, 10, 15 та 20 м відповідно.

Використовуючи отримані у результаті експериментів значення частоти обертання вала рухомого циліндра 3 та сумарної маси вантажу 8, що їй відповідала, за формулою (9) розраховували значення коефіцієнта динамічної в'язкості сапропелю для конкретних умов експерименту.

Під час дослідження використовувались зразки сапропелю відібрані із оз. Зяцьке і сформовані у три проби із вологістю

$$W_1 = 95 \pm 1\%, W_2 = 90 \pm 1\%, W_3 = 85 \pm 1\%.$$

За результатами досліджень коефіцієнта динамічної в'язкості органічного сапропелю при різних швидкостях шарів та гідростатичних тисків побудовані відповіді графічні залежності (рис. 2, 3, 4).

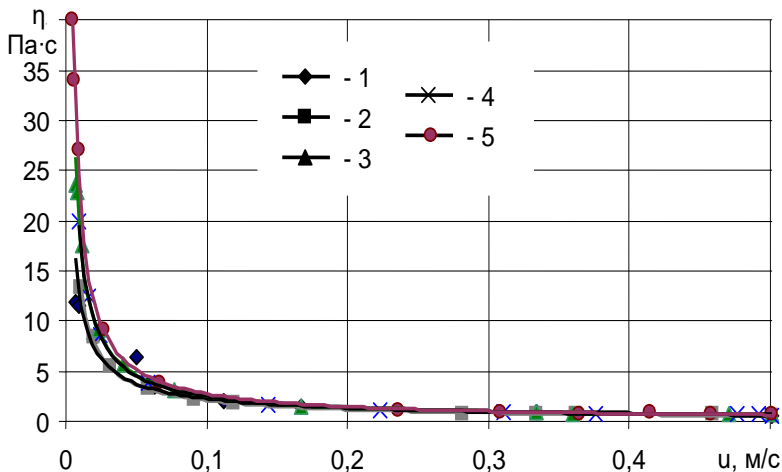


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості η сапропелю вологості $W_1 = 95 \pm 1\%$ від швидкості шарів u за гідростатичного тиску: 1 – $P = 0$ кПа; 2 – $P = 50$ кПа; 3 – $P = 100$ кПа; 4 – $P = 150$ кПа; 5 – $P = 200$ кПа

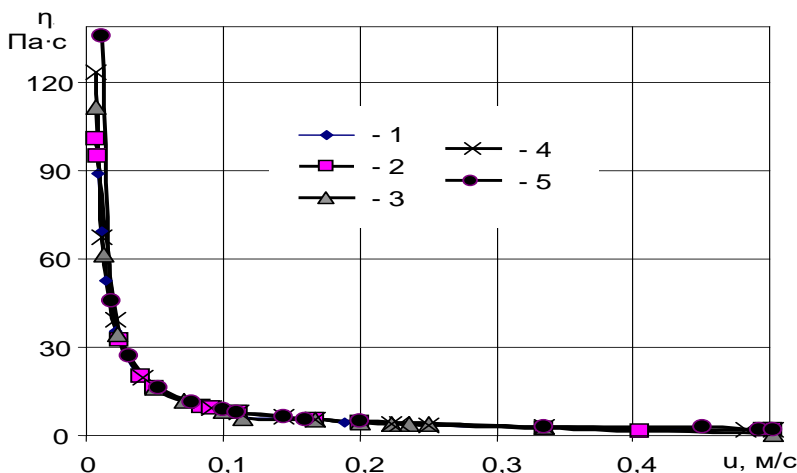


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості η сапропелю вологості $W_2 = 90 \pm 1\%$ від швидкості шарів u за гідростатичного тиску: 1 – $P = 0$ кПа; 2 – $P = 50$ кПа; 3 – $P = 100$ кПа; 4 – $P = 150$ кПа; 5 – $P = 200$ кПа

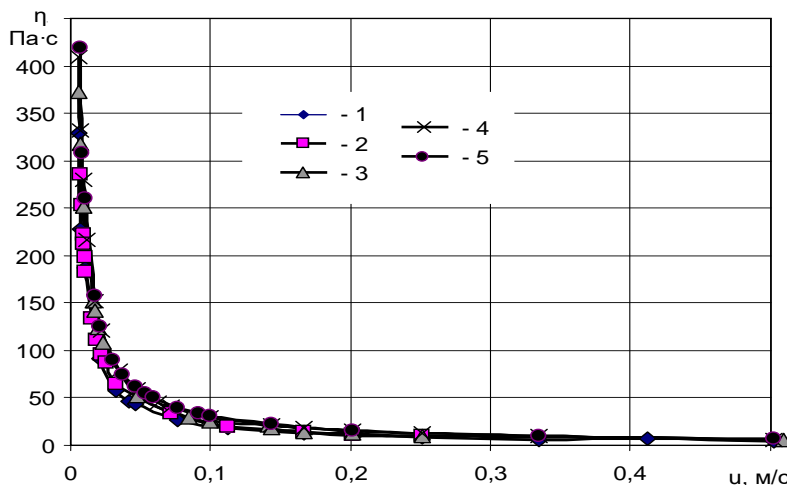


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості η сапропелю вологості $W_3 = 85 \pm 1\%$ від швидкості шарів u за гідростатичного тиску: 1 – $P = 0$ кПа; 2 – $P = 50$ кПа; 3 – $P = 100$ кПа; 4 – $P = 150$ кПа; 5 – $P = 200$ кПа

Із побудованих графічних залежностей видно, що в'язкість сапропелю зменшується із зростанням швидкості деформації зсуву. Особливо значим цей вплив є за зміни швидкостей у діапазоні 0,005...0,2 м/с. Також у даному діапазоні швидкостей виявляється і вплив гідростатичного тиску на зростання в'язкості сапропелю. Очевидно, що таке явище спричинене неомогенною структурою покладів та наявністю волокнистих включень, а отже і наявністю сил зчеплення між ними.

Подальше зростання швидкості відносного руху шарів знижує вплив даного фактору на зменшення в'язкості сапропелю. Результати експериментальних досліджень показують, що швидкості $u > 0,05$ м/с вплив гідростатичного тиску на зміну в'язкості сапропелю не виходить за межі довірчого інтервалу значень, а апроксимація експериментальних значень степеневою функцією у даному діапазоні швидкості забезпечує високу точність (рис. 5).

Також результати експериментальних досліджень дозволяють констатувати значний вплив на зростання в'язкості сапропелю зниження його вологості, і особливо це стосується швидкостей відносного руху шарів $u < 0,2$ м/с. Різке зростання в'язкості спостерігається для сапропелю вологістю $W_3 = 85 \pm 1\%$.

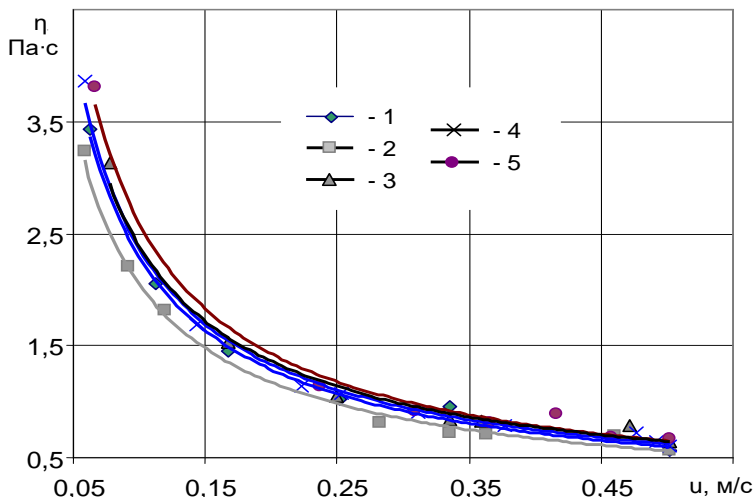


Рис. 5 – Результати апроксимації коефіцієнта динамічної в'язкості η сапропелю вологості $W_1 = 95 \pm 1\%$ степеневою функцією за гідростатичного тиску: 1 – $P=0$ кПа; 2 – $P=50$ кПа; 3 – $P=100$ кПа; 4 – $P=150$ кПа; 5 – $P=200$ кПа

Проведена апроксимація експериментальних значень коефіцієнта в'язкості у діапазоні швидкості $u > 0,05$ м/с без урахування впливу гідростатичного тиску степеневою функцією (рис. 6) дозволила отримати наступні залежності:

$$\text{- для } W_1 = 95 \pm 1\% \quad \mu = 0,352 \cdot u^{-0,8156}; \quad (10)$$

$$\text{- для } W_1 = 90 \pm 1\% \quad \mu = 0,9083 \cdot u^{-0,9725}; \quad (11)$$

$$\text{- для } W_1 = 85 \pm 1\% \quad \mu = 2,5144 \cdot u^{-1,0273}; \quad (12)$$

Висновки. Таким чином результати експериментальних досліджень коефіцієнта динамічної в'язкості сапропелю дозволили виявити значний вплив на дану характеристику вологості покладів та швидкості відносного руху шарів. Вплив гідростатичного тиску суттєвим є лише за швидкості $u < 0,05$ м/с. Оскільки зростання швидкості відносного руху шарів спричинює зниження коефіцієнта в'язкості, то досліджуваний матеріал слід віднести за класифікацією до псевдопластичних матеріалів. Зважаючи на значний діапазон зміни коефіцієнта в'язкості сапропелю залежно від його вологості та швидкості зсуву для практичних розрахунків доцільно використовувати залежності (10)–(12).

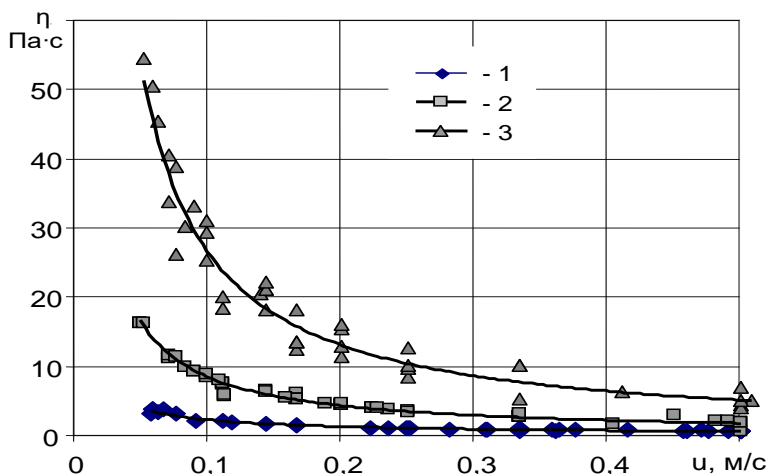


Рис. 6 – Результати апроксимації коефіцієнта динамічної в'язкості μ сапропелю вологості степеневою функцією: 1 – $W_1 = 95 \pm 1\%$; 2 – $W_2 = 90 \pm 1\%$; 3 – $W_3 = 85 \pm 1\%$

Література

1. Пат. 39044 України, МПК E02F 3/08. Забірний пристрій / Цизь І.Є., Хомич С.М. ЛНТУ. – №u200810917; заявл. 05.09.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. №2.
2. Хомич С.М. Моделювання процесу руху бульбашки повітря у середовищі сапропелю / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Зб. наук. ст. – Вип. 42 ч. 2. – Кіровоград: За заг. ред. М.І. Чорновола, 2012. – с. 147–152.
3. Лопотко М.З. Сапропели БССР их добыча / Лопотко М.З. Под ред. академика Г.В. Богомолова – Минск; Наука и техника, 1974 – 208с.
4. Воларович М.П. Заводская лаборатория / Воларович М.П. – М.: 1945, – №10.
5. Сергеев Е.М. Грунтоведение / Сергеев Е.М. – М.;1971 – 251с.

Рецензент д.т.н., проф. Г.А.Хайліс.