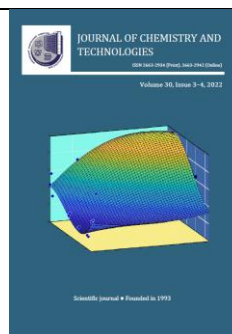




# Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>



UDC 662.757 : 532.584: 544.778.3

## INFLUENCE OF SURFACTANTS ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF OIL-WATER-COAL FUELS

Anatolii S. Makarov<sup>1</sup>, Iryna M. Kosygina<sup>1\*</sup>, Alexander I. Egurnov<sup>2</sup>, Iryna N. Kruchko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry A.V. Dumansky National Academy of Sciences of Ukraine, Blvd. Akademika Vernadskoho, 42, Kyiv, 03142, Ukraine

<sup>2</sup>Limited liability company ANA-TEMS (ANA-TEMS LTD), Dnipro, Ukraine

Received 14 July 2022; accepted 28 September 2022; available online 31 October 2022

### Abstract

The technology for obtaining highly concentrated oil-water-coal fuels used as liquid fuel in power generating plants associated with thermal engineering requirements: maximum filling of the emulsion dispersion medium with combustible components (for example, dispersed coal). In this case, the system must be stable for a long period and have a viscosity that will provide the possibility of easy transportation of fuel through pipes, storage and spraying by nozzles (with a viscosity of 1.5–2 Pa s). To study the effect of chemical reagents on the rheological properties of composite fuel, systems were obtained based on «LG» coal ( $A_d = 9.3\%$ ) with a solid phase content  $St = 40\%$ , used engine oil Comma Xtech 5W-30 ( $C_m = 49\%$ ), water  $C_{H_2O} = 10\%$  and chemical additive 1%. The effectiveness of reducing the viscosity of the system by a chemical additive decreases: RH-1 > DT-2 > ResinAnt 2 > DT-1 > WA-4 > ER-3 > WA-2 > WA-5 > OP-10. Additives such as ResinAnt 2, DT-2, RH-1 have the optimal ability to reduce the viscosity of the oil-water – coal fuels.

Keywords: oil-water-coal fuel; rheological properties; coal; motor oils; viscosity.

## ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАСЛО-ВОДО-ВУГІЛЬНИХ ПАЛИВ

Анатолій С. Макаров<sup>1</sup>, Ірина М. Косигіна<sup>1\*</sup>, Олександр І. Єгурнов<sup>2</sup>, Ірина М. Кручко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, бул. Академіка Вернадського, 42, Київ, 03142, Україна

<sup>2</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю АНА-ТЕМС, Дніпро, Україна

### Анотація

Технологія отримання висококонцентрованих масло-водо-вугільних палив, які застосовуються в якості рідкого палива в енергогенеруючих установках, пов'язана з теплотехнічними вимогами, а саме максимального наповнення дисперсійного середовища у вигляді палива горючими компонентами (наприклад, дисперсним вугіллям). Система повинна бути стабільною протягом тривалого періоду та мати в'язкість, яка забезпечуватиме можливість легкого транспортування по трубах, зберігання і розпилювання форсунками (за в'язкості 1.5–2 Па·с). Для вивчення впливу хімічних реагентів на реологічні властивості композиційного палива були отримані системи на основі вугілля марки «ДГ» ( $A^d = 9.3\%$ ) з вмістом твердої фази  $C_t = 40\%$ , відпрацьованого моторного масла Comma Xtech 5W-30 ( $C_m = 49\%$ ), води  $C_{H_2O} = 10\%$  і хімічної добавки 1%. Встановлено, що ефективність хімічної добавки щодо зменшення в'язкості системи зменшується: RH-1 > DT-2 > ResinAnt 2 > DT-1 > WA-4 > ER-3 > WA-2 > WA-5 > ОП-10. Оптимальною здатністю зменшувати в'язкість масло-водо-вугільних палив мають ResinAnt 2, DT-2, RH-1.

Ключові слова: масло-водо-вугільні палива; реологічні властивості; вугілля, моторні масла; в'язкість.

\*Corresponding author: e-mail address: kosygina@ukr.net

© 2022 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v30i3.247272

## Вступ

Збільшення обсягів споживання нафтопродуктів у транспортній та енергетичній системах, а також активний розвиток групи галузей промисловості (особливо нафтохімічної і нафтопереробної) призводить до накопичення численних відходів у вигляді відпрацьованих масел, нафтошламів та інших нафтовмісних рідин [1–5].

Накопичення і складування з метою подальшої утилізації або регенерації подібних нафтових відходів часто не є надійним способом зберігання. Потрапляючи в різні стоки і водойми, органічні компоненти можуть завдати великої шкоди навколишньому середовищу [6–7]. У зв'язку з цим актуальними стають проблеми зниження впливу даних відходів на навколишнє середовище, а також створення наукових підходів для розвитку енергоефективних технологій їх утилізації.

Вирішити проблему утилізації відходів можна шляхом застосування їх в якості палива на теплоенергетичних станціях (ТЕС) з метою отримання теплової та електричної енергії. Однак у початковому стані зробити це досить важко, оскільки вимагає зміни топкових камер, модифікації систем приготування палива, транспортування і зберігання. Створення масло-водо-вугільних палив (МВВП) для спалювання в ТЕС, а також котельнями та іншими енергетичними установками без значних конструктивних змін [8–10], є перспективним напрямком для вирішення даного завдання.

Технології отримання висококонцентрованих масло-водо-вугільних палив, які застосовують для виробництва рідкого палива і використовуються в енергогенеруючих установках, пов'язані з теплотехнічними вимогами максимального наповнення дисперсійного середовища частинками вугілля, а також стабільністю одержаної продукції протягом тривалого часу, необхідного для транспортування, зберігання і спалювання [11–14]. Складність досягнення максимального ступеня наповнення суспензій пов'язана зі збільшенням в'язкості в міру зростання концентрації дисперсної фази.

Залежно від технології спалювання МВВП вимоги до в'язкості можуть відрізнятися, але, як правило, цей показник не перевищує 1–1.5 Па·с. Знизити в'язкість палив можна методом адсорбційного модифікування поверхні

частинок вугілля за допомогою введення в систему хімічної добавки, наприклад, поверхнево-активних речовин (ПАР). У виборі хімічної добавки для отримання стійких і, разом з тим, текучих висококонцентрованих енергоємних масло-водо-вугільних палив необхідно враховувати ефективність їх впливу на три основні фізико-хімічні процеси: змочування поверхні твердої фази, диспергування твердої фази під час механоактивації і стабілізацію системи. Від цих факторів залежатиме характер дисперсної структури, її реологічні властивості, а також агрегативна і седиментаційна стійкість.

У зв'язку з великою кількістю існуючих добавок, ефективність дії кожної з них буде визначатися складом вугілля, зольністю, ступенем окиснення, наявністю залишків флокулянтів, а також залежатиме від природи і властивостей дисперсійного середовища масел і технології отримання та кінцевої мети використання МВВП. Узагальнюючи існуючий досвід застосування хімічних добавок, їх можна розділити на диспергатори, пластифікатори, стабілізатори, емульгатори і змочувачі. Більшість із застосовуваних хімічних добавок, які придатні для водовугільних палив, не підходять для масло-водо-вугільних палив. Тому метою роботи був аналіз промислових хімічних добавок та виявлення найкращих для приготування МВВП.

## Експериментальна частина

З метою вивчення впливу хімічних реагентів на реологічні властивості композиційного палива були отримані системи на основі вугілля марки «ДГ» ( $A^d = 9.3\%$ ) з вмістом твердої фази  $C_T = 40\%$ , відпрацьованого моторного масла Comma Xtech 5W-30 ( $C_M = 49\%$ ), вмістом води  $C_{H_2O} = 10\%$  і хімічної добавки – 1%. У табл. 1 наведені фізико-хімічні характеристики реагентів, які було використано для приготування композиційного палива.

Вихідне вугілля з діаметром частинок  $d = 1$  мм подрібнювали у фарфоровому планетарному млині (робочий об'єм 2 дм<sup>3</sup>) до частинок розміром не більше 0.25 мм. Для цього використовували керамічні кулі. З метою виключення впливу фактору різної дисперсності на реологічну поведінку дисперсних систем [15], всі зразки вугілля просівали на ситах СЛМ 200 і отримували порошки однакового гранулометричного складу: фракція 250–160 мкм – 40%, 160–100

мкм – 20 %, 100–63 мкм – 5 %, 63–40 мкм – приведено в табл. 2.  
32 %. Технічний та елементний аналіз вугілля

Таблиця 1

## Характеристики хімічних добавок

Table 1

## Characteristics of chemical additives

| Добавка                | Вид                      | Витрата,%<br>від маси<br>робочого<br>розчину | Зовнішній<br>вигляд | Густина<br>г/см <sup>3</sup> | рН 1 %<br>водного<br>р-на | Розчинність |         |                     |
|------------------------|--------------------------|--|---------------------|------------------------------|---------------------------|-------------|---------|---------------------|
|                        |                          |  |                     |                              |                           | у воді      | у маслі | в орган.<br>розчин. |
| <b>ResinAn<br/>t 2</b> | Диспергатор-<br>змочувач | 1  | в'язка<br>рідина    | 1                            | 7                         | +           | +       | -                   |
| <b>DT-1</b>            | Диспергатор              | 0.1–2  | в'язка паста        | 0.8                          | 7                         | +           | +       | -                   |
| <b>DT-2</b>            | Диспергатор              | 0.1–2  | в'язка паста        | 0.9                          | 6                         | +           | +       | -                   |
| <b>ER-3</b>            | Емульгатор               | 0.1–1  | в'язка паста        | 1                            | 7                         | +           | +       | -                   |
| <b>RH-1</b>            | Реологічна<br>добавка    | 0.1–3  | в'язка<br>рідина    | 1                            | 7                         | +           | +       | -                   |
| <b>ОП-10</b>           | Змочувач                 | 1  | в'язка<br>рідина    | 1.05                         | 6–8                       | +           | -       | -                   |
| <b>WA-2</b>            | Змочувач                 | 0.1–1  | в'язка<br>рідина    | 1                            | 7                         | +           | +       | +                   |
| <b>WA-4</b>            | Змочувач                 | 0.1–1  | в'язка паста        | 1                            | 5                         | +           | -       | -                   |
| <b>WA-5</b>            | Змочувач                 | 0.1–2  | в'язка паста        | 1                            | 7                         | +           | -       | -                   |

Таблиця 2

## Технічний та елементний аналіз вугілля [16]

Table 2

## Technical and elemental analysis of coal [16]

| Технічний аналіз, мас.% |                |                  | Елементний аналіз, % |     |     |      |     |
|-------------------------|----------------|------------------|----------------------|-----|-----|------|-----|
| W <sub>a</sub>          | A <sub>d</sub> | V <sub>daf</sub> | C                    | H   | N   | O    | S   |
| 9.8                     | 9.3            | 43.8             | 46.2                 | 4.9 | 1.1 | 13.7 | 4.1 |

Структурно-сорбційні характеристики порошків вугілля: густина ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>), питому поверхню ( $S_{sp}$ , м<sup>2</sup>/г), питомий об'єм пор ( $V_{pore}$ , см<sup>3</sup>/г) і ефективний діаметр пор ( $d_{pore}$ , нм) розраховували методом Брунауера-Емента-Телера [16] із результатів вимірювань низькотемпературної (77 К) адсорбції азоту на аналізаторі питомої поверхні Quantachrome Nova (табл. 3). Розподіл поверхневих функціональних груп за кислотністю

визначали, знаючи повну обмінну ємність (ПОЄ) вугілля, з урахуванням результатів нейтралізації цих груп 0.1 н. водними розчинами NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> і NaHCO<sub>3</sub> [17]. Неорганічна складова вугілля за даними рентгенофазового аналізу (дефрактметр ДРОН 2, CuK $\alpha$ -випромінювання, Со-фільтр,  $\lambda$  = 1.542 нм) представлена переважно кварцом, каолінітом і гідрослюдою.

Таблиця 3

## Структурно-сорбційні характеристики вугілля

Table 3

## Structural sorption properties of coal

| $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $S_{sp}$ , м <sup>2</sup> /г | $V_{pore}$ , см <sup>3</sup> /г | $d_{pore}$ , нм | Вміст функціональних груп, мг-екв / г |      |      | ПОЄ,<br>мг-екв/г |
|----------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------------|------|------|------------------|
|                            |                              |                                 |                 | -COOH                                 | -OH  | >C=O |                  |
| 1.3                        | 1.386                        | 0.053                           | 7.670           | 0.09                                  | 0.32 | 0.21 | 0.15             |

Для отримання МВВП проводили гомогенізацію порошку вугілля з додаванням моторного масла Comma Xtech 5W-30 з характеристиками, наведеними в табл. 4, та 1 % хімічної добавки на масу твердої фази. Мета гомогенізації – створення стійкої в часі однорідної структури в дво- чи багатофазній системі ліквідацією концентраційних

мікронеоднорідностей, внаслідок чого поліпшуються реологічні властивості суспензій. Гомогенізацію проводили на лабораторній роторній лопатній мішалці й колоїдному млині, які відрізняються між собою будовою робочих поверхонь, а також швидкістю гомогенізації, що залежить від кількості обертів – 2000 і 5000 відповідно.

## Технічні характеристики моторного масла [18]

Table 4

## Engine oil specifications [18]

| Характеристики масел         | Марка масла             |
|------------------------------|-------------------------|
|                              | Comma Xtech 5W-30       |
| Клас в'язкості,              | 5W-30                   |
| Густина при 20°C (68°F),     | 0.848 г/см <sup>3</sup> |
| В'язкість при 40°C (104°F),  | 55 мм <sup>2</sup> /с   |
| В'язкість при 100°C (212°F), | 9.9 мм <sup>2</sup> /с  |
| Індекс в'язкості             | 166                     |
| Температура застигання       | -36 °C / -33 °F         |
| Температура спалаху          | 230 °C / 446 °F         |
| Сульфатна зольність          | 1.1 % маси              |
| Лужне число                  | 10.0 мг КОН/г           |

Основні реологічні параметри масло-водо-вугільних палив: ефективну в'язкість  $\eta_{ef}$  (Па·с), напругу зсуву  $\tau$  (Па) визначали на приладі "Rheotest 2" за допомогою коаксіальних гладких циліндрів виміральної системи S/S<sub>2</sub> швидкостях зсуву ( $\gamma$ , з-1). Значення мінімальної в'язкості ( $\eta_{min}$ ), ефективної ( $\eta_{ef}$ ) і максимальної ( $\eta_{max}$ ) визначали за  $\gamma = 1,0; 9,0$  і  $437,4$  с<sup>-1</sup> відповідно.

## Результати і обговорення

Важливу роль в механохімічних процесах отримання МВВП належить середовищу, в якому проводиться диспергування. Частинки дисперсної фази мають фізико-хімічно і енергетично неоднорідну поверхню, тобто для них характерна ліофільно-ліофобна мозаїчність. З цієї причини міцність контактів між частинками вугілля в дисперсному середовищі може відрізнятися на кілька порядків, в залежності від того, на яких ділянках відбувається адсорбція дифільних молекул ПАР [19]. Поверхня вугілля гетерогенна, тобто складається із гідрофільних і гідрофобних ділянок.

Функціональні групи органічної та мінеральної складової обумовлюють гідрофільність вугілля, а циклічні ароматичні структури і алкільні радикали – його гідрофобність. Гідрофобні частинки вугілля у водному середовищі агрегуються, в результаті зростає в'язкість і знижується стабільність МВВП. Адсорбційне модифікування поверхні частинок вугілля дифільними молекулами ПАР дозволяє підвищити їх споріднення з дисперсійним середовищем [20–21], обумовлюючи взаємодії твердої і рідкої дисперсійних фаз, сприяючи створенню стійкої колоїдної системи.

Результати дослідження впливу хімічних реагентів на реологічні властивості висококонцентрованих масло-водо-вугільних палив подані в табл. 5, 6. Як видно з табл. 5, найменшу ефективну в'язкість за швидкості зсуву  $D\dot{\gamma} = 9$  с<sup>-1</sup> ( $\eta_{eff} = 0.99$  Па·с) мала система із додаванням реологічної добавки RH-1, трохи більшу – із застосуванням диспергатора DT-2 ( $\eta_{eff} = 1.07$  Па·с), найбільшу в'язкість – система із вмістом ОП-10 ( $\eta_{eff} = 3.05$  Па·с).

Таблиця 5

Характеристики динамічної в'язкості масло-водо-вугільних палив на основі вугілля «ДГ» при різних хімічних добавках

Table 5

Characteristics of the dynamic viscosity of oil-coal-water fuels based on «LG» coal with various chemical additives

| D, с <sup>-1</sup> | Resin Ant 2   | DT-1          | DT-2          | ER-3          | RH-1          | ОП-10         | WA-2          | WA-4          | WA-5          |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с | $\eta$ , Па·с |
| 1                  | 2.39          | 3.16          | 2.27          | 4.66          | 1.85          | 5.37          | 4.66          | 3.22          | 6.21          |
| 1.8                | 1.92          | 2.35          | 1.66          | 3.81          | 1.63          | 5.31          | 3.68          | 2.89          | 5.34          |
| 3                  | 1.59          | 2.17          | 1.39          | 3.16          | 1.39          | 4.48          | 3.02          | 2.21          | 4.32          |
| 5.4                | 1.34          | 1.82          | 1.24          | 2.30          | 1.19          | 3.67          | 2.54          | 1.90          | 3.54          |
| <b>9</b>           | <b>1.27</b>   | <b>1.63</b>   | <b>1.07</b>   | <b>1.80</b>   | <b>0.99</b>   | <b>3.12</b>   | <b>2.12</b>   | <b>1.74</b>   | <b>3.05</b>   |
| 16.2               | 1.15          | 1.51          | 0.97          | 1.40          | 0.79          | 2.69          | 1.72          | 1.66          | 2.24          |

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 27    | 1.06 | 1.40 | 0.89 | 1.22 | 0.66 | 2.34 | 1.51 | 1.57 | 1.76 |
| 48.6  | 0.94 | 1.24 | 0.79 | 1.07 | 0.52 | 1.89 | 1.35 | 1.44 | 1.28 |
| 81    | 0.83 | 1.17 | 0.70 | 0.93 | 0.44 | 1.70 | 1.14 | 1.35 | 0.99 |
| 145.8 | 0.76 | 1.05 | 0.61 | 0.79 | 0.36 | 1.50 | 0.95 | 1.20 | 0.87 |
| 243   | 0.67 | 0.96 | 0.55 | 0.74 | 0.31 | 1.37 | 0.89 | 1.13 | 0.77 |
| 437.4 | 0.61 | 0.89 | 0.47 | 0.67 | 0.27 | 1.25 | 0.79 | 1.01 | 0.67 |

Загальновідомо, що ефективна в'язкість суспензій і емульсій незалежно від способів і умов її вимірювання пропорційна в'язкості дисперсійного середовища. Також багато дисперсних систем, призначених для промислового використання, мають певні обмеження по значенню в'язкості. Якщо в якості дисперсійного середовища застосовуються дві або кілька рідин,

величина і характер зміни в'язкості дисперсійних систем, як і в'язкості емульсій, будуть визначатися, за інших умов, їх відносним вмістом. У силу того, що міжмолекулярні взаємодії в сумішах рідин призводять до утворення різних за структурою асоціатів, в'язкість суміші може як зростати, так і зменшуватися, в залежності від її складу [22–23].

Таблиця 6

Характеристики текучості масло-водо-вугільних палив на основі вугілля «ДГ» при різних хімічних добавках

Table 6

Fluidity characteristics of oil-water-coal fuels based on «LG» coal with various chemical additives

|                    | Resin<br>Ant 2 | DT-1         | DT-2        | ER-3         | RH-1        | OP-10        | WA-2         | WA-4         | WA-5         |
|--------------------|----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| D, c <sup>-1</sup> | $\tau$ , Па    | $\tau$ , Па  | $\tau$ , Па | $\tau$ , Па  | $\tau$ , Па | $\tau$ , Па  | $\tau$ , Па  | $\tau$ , Па  | $\tau$ , Па  |
| 1                  | 2.39           | 3.16         | 2.27        | 4.66         | 1.85        | 5.37         | 4.66         | 3.22         | 6.21         |
| 1.8                | 3.46           | 4.24         | 2.99        | 6.87         | 2.93        | 9.55         | 6.63         | 5.19         | 9.61         |
| 3                  | 4.78           | 6.51         | 4.18        | 9.49         | 4.18        | 13.43        | 9.07         | 6.63         | 12.95        |
| 5.4                | 7.22           | 9.85         | 6.69        | 12.42        | 6.45        | 19.82        | 13.73        | 10.27        | 19.10        |
| <b>9</b>           | <b>11.40</b>   | <b>14.69</b> | <b>9.67</b> | <b>16.24</b> | <b>8.90</b> | <b>28.06</b> | <b>19.10</b> | <b>15.64</b> | <b>27.46</b> |
| 16.2               | 18.63          | 24.48        | 14.98       | 22.75        | 12.84       | 43.58        | 27.82        | 26.87        | 36.24        |
| 27                 | 28.60          | 37.73        | 22.27       | 32.84        | 17.91       | 63.25        | 40.78        | 42.45        | 47.64        |
| 48.6               | 45.67          | 60.38        | 35.08       | 51.94        | 25.37       | 92.00        | 65.67        | 69.85        | 62.09        |
| 81                 | 64.98          | 94.88        | 52.90       | 75.33        | 35.82       | 138.00       | 92.00        | 109.25       | 86.25        |
| 145.8              | 98.90          | 152.95       | 84.53       | 115.00       | 52.33       | 218.50       | 139.15       | 175.38       | 136.28       |
| 243                | 151.80         | 232.88       | 121.33      | 179.40       | 74.75       | 333.50       | 217.35       | 274.85       | 204.13       |
| 437.4              | 237.48         | 391.00       | 195.50      | 277.15       | 119.60      | 546.25       | 346.15       | 469.78       | 311.08       |

Слід зазначити, що одержані МВВП не розшаровуються протягом тижня за зберігання в статичних умовах навіть за відсутності стабілізуючих реагентів. Це можна пояснити тим, що в системі спостерігається утворення просторової сітки з міцною фіксацією анізотричних частинок вугілля без втрати седиментаційної стійкості.

Оскільки в процесі приготування та транспортування МВВП піддаються різним

механічним впливам в широкому діапазоні швидкостей зсуву, що може призвести до загущення або втрати текучості, нами були побудовані на основі експериментальних даних криві в'язкості (рис. 1) та криві текучості (рис. 2) досліджуваних систем МВВП, що дозволяють простежити зміну зазначених параметрів в залежності від прикладеного навантаження.

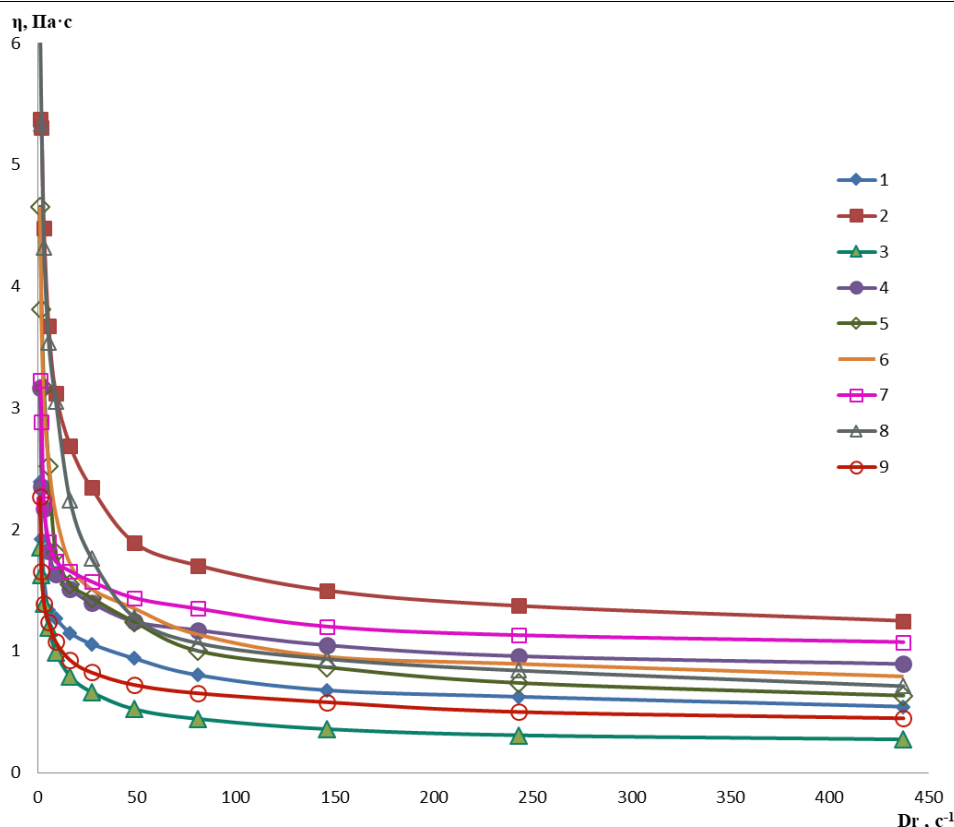


Fig.1. Curves of dynamic viscosity of oil-water-coal fuel on the basis of coal of the LG brand and the fulfilled engine oil:

Рис.1. Криві динамічної в'язкості масло-водо-вугільного палива на основі вугілля марки «ДГ» і відпрацьованого моторного масла :

- |   |            |
|---|------------|
| 1 | ResinAnt 2 |
| 2 | ОП-10      |
| 3 | РН-1       |
| 4 | DT-1       |
| 5 | ER-3       |
| 6 | WA-2       |
| 7 | WA-4       |
| 8 | WA-5       |
| 9 | DT-2       |

У процесі дослідження реологічних властивостей і процесів структуроутворення МВВП на основі вугілля марки «ДГ» спостерігаються ділянки різкого падіння в'язкості в діапазоні швидкостей зсуву  $Dr = 1.0-16.2 \text{ s}^{-1}$  (рис. 1), які вказують на руйнування структури емульсії, і ділянки значного падіння в'язкості, характерні для перебігу систем з істотно зруйнованою структурою. Крім руйнування структури, додатковим чинником, що знижує в'язкість системи зі зростанням швидкості зсуву, може бути орієнтація анізотричних частинок

вугілля в потоці [24–25]. За перевищення швидкості зсуву  $Dr > 100 \text{ s}^{-1}$  досліджувані системи МВВП характеризуються виходом на ділянки ньютонівської течії, коли спостерігається лінійний характер залежності в'язкості від швидкості зсуву. Така поведінка підтверджує можливість застосування МВВП для факельного спалювання в енергетичних установках. Отже із отриманих даних можна зробити висновок, що найменшу в'язкість мають системи МВВП з додаванням реологічної добавки РН-1, а максимальною – ОП-10.

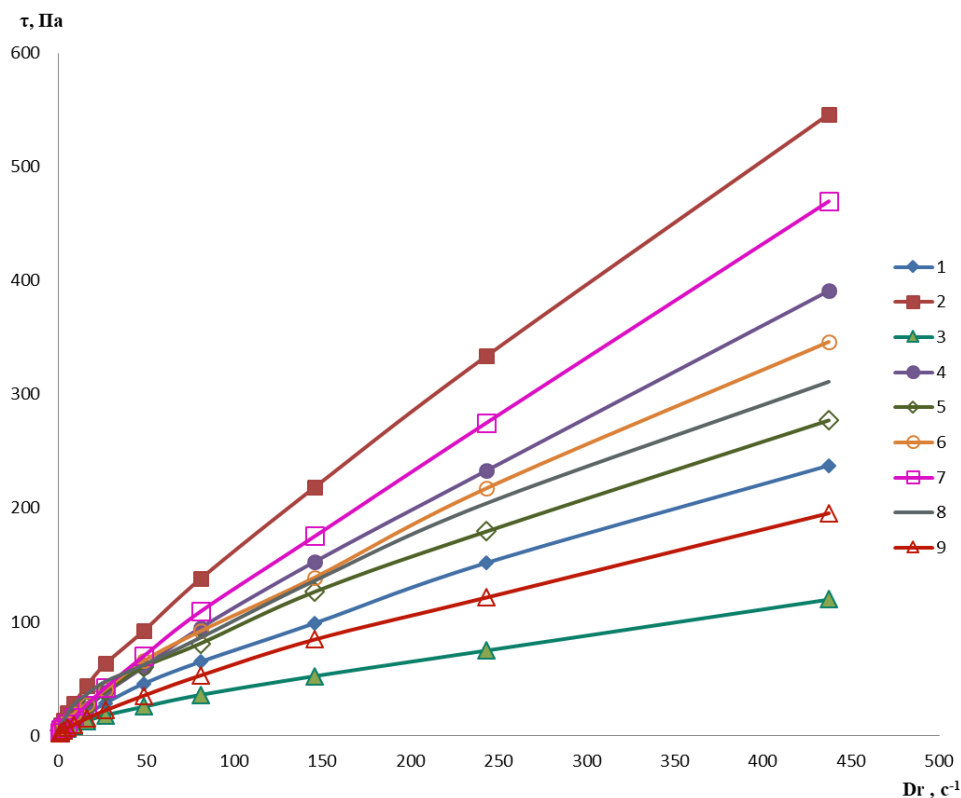


Fig.2. Fluidity curves of oil-water-coal fuel on the basis of coal of the LG brand ( $A^d = 9.3 \%$ )  
 Рис. 2. Криві текучості масло-водо-вугільного палива на основі вугілля марки «ДГ» ( $A^d = 9.3 \%$ )

Криві текучості (рис. 2) мають вигляд, характерний для псевдопластичної рідини неньютоновських рідин, що пов'язано з руйнуванням контактів між частинками в структурі. Структуроутворення в системі слід розуміти як встановлення коагуляційних контактів між частинками і їх адсорбційною взаємодією з дисперсійним середовищем. Наслідком руйнування контактів частинок в структурі є результат неньютонівського характеру течії системи – перехід від в'язкопластичної до псевдопластичної рідини [26]. На рис.2 криві течії демонструють зменшення міцності системи зі зростанням швидкості зсуву. Аналіз впливу швидкості зсуву на текучість показав, що найбільш міцна структура палива спостерігається з додаванням ОП-10, а найменш міцна — з додаванням реологічної добавки RH-1.

## References

- [1] International Energy Outlook with projections to 2040. (2013). Washington: U.S. Energy Information Administration. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf)
- [2] Lam, S.S., Liew, K., Cheng, C.K., Chase, H.A. (2015). Catalytic microwave pyrolysis of waste engine oil using metallic pyrolysis char. *Appl. Catal., B* 176–177(1), 601–617. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.014>
- [3] Chayka, O. G. Kovalchuk, O. Z., Chayka, Y. A. (2009). Monitoring the formation of waste oils. *Proceedings Scientific Works*, 221–224.
- [4] Kapustina, V., Havukainen, J., Virkki-Hatakka, T., Horttanainen M. (2014.) System analysis of waste oil management in Finland. *Waste Manage. Res.* 32(4), 297–303. <https://doi.org/10.1177/0734242X14523663>
- [5] Statistical Review of World Energy. London: BP. (2016). <http://www.bp.com>

## Висновки

З отриманих даних можна зробити висновок, що оптимальною здатністю зменшувати в'язкість МВВП на основі масла Comma Xtech 5W-30 (з концентрацією масляної фази  $C_m = 49 \%$ ) та вугілля марки «ДГ» (з концентрацією твердої фази  $C_T = 40 \%$ ), з додавання води (концентрацією  $C_{H_2O} = 10 \%$ ) і 1% хімічного реагенту мають ResinAnt 2, DT-2, RH-1. На підставі даних табл. 5 видно, що ефективність хімічної добавки (здатність знижувати в'язкість) зменшується в ряду: RH-1 > DT-2 > ResinAnt 2 > DT-1 > WA-4 > ER-3 > WA-2 > WA-5 > ОП-10.

Таким чином, виходячи із результатів реологічних досліджень впливу поверхнево-активних речовин на властивості МВВП, цілком можна пропонувати колоїдні системи на основі добавок ResinAnt 2, DT-2, RH-1 для випробування в промислових умовах.

- [6] Boughton, B. (2004). Environmental Assessment of Used Oil Management Methods *Environ. Sci. Technol.* 38(2), 353–358. <https://doi.org/10.1021/es034236p>
- [7] Goncharuk, V.V., Makarov, A. S., Kosygina, I. M. Prospects for using composite liquid fuel in power engineering. (2020) *The Problems of General Energy*, 2(61), 38–42. doi: <https://doi.org/10.15407/pge2020.02.038>
- [8] Kurgankina, M. A., Nyashina, G. S., Strizhak, P. A. (2019). Prospects of Thermal Power Plants Switching from Traditional Fuels to Coal-Water Slurries Containing Petrochemicals. *Sci. Total Environ.*, 671, 568–577. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.03.349](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.349)
- [9] Glushkov, D. O., Strizhak, P. A., Chernetskiy, M. Yu. (2016). [Organovodougolnoe toplivo: problemy i dostizheniya (obzor).] *Teploenergetika*, 10, 31–41. (in Russian) doi: [10.1134/S0040363616100039](https://doi.org/10.1134/S0040363616100039)
- [10] Zhang, K., Cao, Q., Jin, L., Li, P., Zhang, X. (2017). A Novel Route to Utilize Waste Engine Oil by Blending It With Water and Coal. *J. Hazard. Mater.* 332, 51–58. doi: [10.1016/j.jhazmat.2017.02.052](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.052)
- [11] Gorlov, Ye. G. (2004). [Kompozitsionnye vodosoderzhashchie topliva iz ugley i nefteproduktov]. *Khim. tverdogo topliva*, (6), 50–61. (in Russian)
- [12] Pynchuk, V. A., Ghubynskyj, M. V., Potapov, B. B. (2008). [Yspolzovanye vodougholnogo toplyva y produktov egho pererabotky v energhetyke y metallurghyy]. *Metalurghijna teplotekhnika: Zb. nauk. pr. Nacionalnoji metalurghijnoji akademiji Ukrainy. Dnepropetrovsk: Novaja ydeologhyja*, 221–227. (in Ukraine)
- [13] Mokhov, V. F., Gorlov, Ye. G., Golovin, G. S. (1999). [Ugolno-uglevodorodnye kompozitsionnye topliva iz ugley Kuzbassa.] *Khim. i prirodosbergayushchie tekhnologii ispolzovaniya uglya: Sbornik trudov mezhdunarodnoy konferentsii. M.:MGU*, 69–71. (in Russian)
- [14] Tripathi, A.K., Ojha, D.K., Vinu, R. (2015.) Selective production of valuable hydrocarbons from waste motorbike engine oils via catalytic fast pyrolysis using zeolites. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 114, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.06.009>
- [15] Lapin, D. A., Lyrshchikov, S. Yu., Strizhak, P. A., Shevyrev, S. A. (2017). [Vliyanie fraktsionnogo sostava tverdykh komponentov vodougolnogo topliva na kharakteristiki zazhiganiya i goreniya] *Khim. tverdogo topliva*, 2, 23–29. (in Russian)
- [16] Makarov, A. S., Makarova, K. V. (2020) [Physico-chemical and technological bases for the formation of coagulation structures of technical dispersions]. *Kyiv Scientific thought*. (in Ukraine).
- [17] Gyulmaliev A.M., Golovin G.S., Gladun T.G. (2003). [Teoreticheskie osnovy khimii uglya]. M.: Izdatelstvo MGU. (in Russian)
- [18] Motornye masla Comma Xtech 5W-30. [www.CommaOil.com](http://www.CommaOil.com)
- [19] Urev, N. B. (1980). [Vysokokontsentrirrovannye dispersnye sistemy]. M.: Khim.
- [20] Rebinder, P. A. (1979). [Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika], M.: Nauka. (in Russian).
- [21] Veselovskaya, Ye. V. (2017). [Issledovanie struktury i osobennostey adsorbtsionnykh vzaimodeystviy na poverkhnosti energeticheskikh ugley]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2 (194), 40-45. (in Russian)
- [22] Kruchko, I. M., Makarov, A. S., Kosyghina, I. M.. (2020) [Vplyv ghranulometrychnogo skladu dyspersnoji fazy na reologichni vlastyvoli maslo-vodo-vughilnykh emulsiy na osnovi antracytu]. *Vughlekhimichnyy zhur.*, (4), 4–7. (in Ukrainian). doi: 10.31081/1681-309X-2020-0-4-4-8.
- [23] A.V. Zenkov, D.V. Gvozdyakov, V.Ye. Gubin. (2020) [Vliyanie zhidkikh goryuchikh komponent na vyazkost vodougolnogo topliva]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 20(3), 26–32. doi: 10.14529/power200303
- [24] Khodakov G.S. (2003). [Reologiya suspenziy. Teoriya fazovogo techeniya i ee eksperimentalnoe obosnovanie]. *Rossiyskiy khim. Zhur.* 47(2),33–44. (in Russian).
- [25] Savitskiy, D. P. (2016) [Vliyanie vodno glitserinovykh smesey na reologicheskie svoystva suspenziy uglya]. *Kolloidnyy zhur.*, 78(1), 95–100. DOI: <https://doi.org/10.7868/S002329121601016X> (in Russian).
- [26] Makarova, Ye. V., Makarov, A. S., Savitskiy, D. P. (2015). [Vliyanie vodorastvorimykh polimerov na stabilnost vodnykh suspenziy nizkozolnogo uglya]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 1(99), 26–29. (in Ukrainian).