

УДК 621.435

А.В. ГОНЧАРЕНКО

*Херсонський державний морський інститут, Україна***АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОВУГІЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ У СУДНОВИХ ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

Наведено аналітичний огляд експериментальних досліджень стосовно реологічних характеристик водовугільних суспензій. Увагу приділено вперше виявленій Siebers D.L. та Dyer T.M. у 1986 році аномальній залежності нормальної густини палива від температури його підігріву. Складено математичну модель впливу параметрів на зміну густини водовугільних суспензій. Виконано інтерполяцію поліномом третього ступеня та апроксимацію поліномом четвертого ступеня. Простежено зміну оптимальних значень густини залежно від зміни визначальних параметрів. Проведено розрахункові експерименти. Побудовано відповідні графіки залежності густини від зміни температури та визначальних параметрів.

Ключові слова: водовугільні суспензії, густина палива, твердопаливні поршневі двигуни, суднові двигуни внутрішнього згоряння, реологічні характеристики, температура палива, визначальні параметри, оптимальні значення.

Вступ

Дослідження пов'язані з удосконаленням експлуатації твердопаливних поршневих двигунів є актуальними оскільки обмеженість світових запасів нафти зумовлює пошук альтернативних видів палива для застосування у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ). На морському транспорті більшість суден обладнані саме ДВЗ. У суднових ДВЗ (СДВЗ) у якості палив дедалі частіше використовуються усе важчі сорти. Важкі сорти палив з високою густиною практично у двічі дешевші за дистильатні, тому їхнє застосування у СДВЗ є економічно виправданим. Однак, незабаром запаси нафти буде вичерпано. Виходячи з аналізу світових ресурсів невідновлюваних палив, найбільш перспективними у якості альтернативних палив для ДВЗ є вугільні [1, с. 74].

Новизна полягає у способі моделювання та пошуку оптимальних значень показників, що характеризують експлуатаційні властивості палив, які містять тверді компоненти та виконані у вигляді водовугільних суспензій (ВВС).

Постановка проблеми у загальному вигляді має зв'язок з важливими науковими та практичними задачами оптимізації паливоподачі ВВС у зв'язку зі зміною густини від температури.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розв'язання проблеми застосування твердих палив у ДВЗ триває понад 330 років [1, с. 5]. У роботі [1] започатковано, серед іншого, ґрунтовний підхід до виявлених явищ при дослідженні реологічних ха-

рактеристик вугільних суспензій (ВС). Зокрема, у розділі присвяченому реологічним властивостям ВВС мова йде про фактори, що впливають на здатність палива текти, а [1, с. 107] додає виявлену аномальну залежність нормальної густини від температури аж до повного затвердіння суспензії. Вперше таку поведінку ВВС спостерігали у своїх дослідженнях Siebers D.L. та Dyer T.M. у 1986 р. При досягненні суспензією температури стінок експериментальної камери (147 °C), вона ставала твердою прямо у розпилювачі форсунки [2]. Таке саме явище відмічалося у подальшому при дослідженні реологічних характеристик ВВС, які проводилися у МДТУ ім. Баумана. При підвищенні температури густина ВВС спочатку знижувалася, а при досягненні 100 °C знову починала зростати (рис. 1, [1, с. 107 рис. 3.9]). На підставі обробки експериментальних даних було запропоновано вираз для приблизної оцінки динамічної густини при нагріванні ВВС до температур 120...130 °C [3]:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_t}{\eta_{20}} = 0,32 + 1,0625 \cdot 10^{-4} \cdot (t - 100)^2, \quad (1)$$

де $\bar{\eta}$ – відносна густина ВВС;

η_t – густина ВВС при даній температурі;

η_{20} – густина при температурі 20 °C;

t – температура ВВС.

Механізм такої поведінки ВВС до теперішнього часу залишається нез'ясованим.

Розглядаючи параметр η на графіку (рис. 1), як η_t формули (1), виділяються не вирішені раніше час-

тини загальної проблеми, котрим присвячується дана стаття.

Виходячи з аналітичного вигляду виразу (1), η , як функція від температури t , є функцією парною стосовно різниці температур $(t - 100)$, тобто графік такої залежності має бути симетричним відносно прямої паралельної осі ординат, та, яка проходить через значення на осі абсцис (температур) $t = 100$ °C.

У роботах [4 – 6] застосовуються методи оптимізації, які доцільно залучити при розв'язанні задач даної статі.

Роботи [5 – 7] дають змогу врахувати у явному вигляді суб'єктивні переваги особи, що приймає рішення.

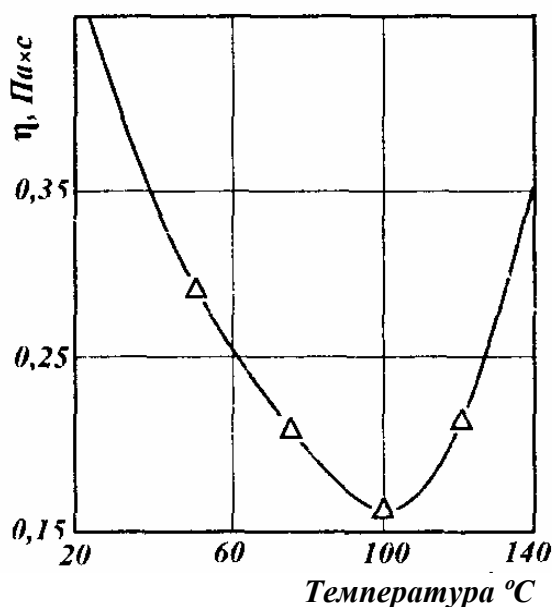


Рис. 1. Зміна густини ВВС у залежності від температури

Таким чином математична модель (1) не досить адекватно описує характер зміни важливої реологічної характеристики ВВС. До того ж, не з'ясовано вплив параметрів апроксимаційної залежності (1) на поведінку оптимальних значень густини.

Мінімальне значення густини за формулою (1) отримується якщо $\eta_{20} \approx 0,5$ Па·с.

Постановка задачі. Метою даної статі є скласти більш адекватну математичну модель виразу для приблизної оцінки реологічних властивостей ВВС. Простежити характер змін оптимальних значень густини залежно від параметрів моделі.

Основний матеріал

Для більш адекватного виразу, котрий відповідає даним експериментальних досліджень (рис. 1) [2, 3], з метою врахування швидшого збільшення

густини при зростанні температур у зоні $t > (t_{\text{opt}} = t|_{\eta_{\text{min}}})$, порівняно з більш повільним зменшенням густини при підвищенні температури у діапазоні температур $t < (t_{\text{opt}} = t|_{\eta_{\text{min}}})$, застосуємо інтерполяцію та апроксимацію поліноміальними залежностями порядку вище другого.

Інтерполяція поліномом третього ступеня

Для інтерполяції залежності $\eta(t)$ поліномом третього ступеня використаємо експериментальні дані (рис. 1) [3]. У чотирьох точках маємо значення температур $t = 50; 75; 100; 120$ °C, густини $\eta = 0,29; 0,21; 0,16; 0,22$ відповідно. Шукана залежність має вигляд

$$\eta(t) = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d, \quad (2)$$

де a, b, c, d – відповідні невідомі коефіцієнти.

Для отримання значень коефіцієнтів a, b, c, d скористаємось способом застосованим у роботі [4]. Система рівнянь для отримання значень коефіцієнтів інтерполяційної залежності:

$$\left. \begin{aligned} \eta(t_{50}) &= a \cdot t_{50}^3 + b \cdot t_{50}^2 + c \cdot t_{50} + d; \\ \eta(t_{75}) &= a \cdot t_{75}^3 + b \cdot t_{75}^2 + c \cdot t_{75} + d; \\ \eta(t_{100}) &= a \cdot t_{100}^3 + b \cdot t_{100}^2 + c \cdot t_{100} + d; \\ \eta(t_{120}) &= a \cdot t_{120}^3 + b \cdot t_{120}^2 + c \cdot t_{120} + d, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $\eta(t_{50}), \dots, \eta(t_{120})$ – густина ВВС при температурах $t = 50; 75; 100; 120$ °C;

$t_{50}, \dots, t_{120}$ – значення температур $t = 50; 75; 100; 120$ °C.

Отримані при розв'язанні системи (3) значення коефіцієнтів a, b, c, d дозволяють побудувати графік залежності (2), показано $\eta(t)$ на рис. 2.

При значеннях коефіцієнтів $a = 1,244 \cdot 10^{-6}$; $b = -2,56 \cdot 10^{-4}$; $c = 0,014$; $d = 0,073$, залежність, позначена $\eta(t)$, проходить точно за заданими точками. У діапазоні робочих температур $t = 50 \dots 130$ °C вона точніше відображає зміну густини аніж залежність $\eta_{-}(t) \cdot \eta_{20}$ отримана з допомогою виразу (1) проілюстрованого у вигляді $\eta_{-}(t)$.

При температурах менших за 50 °C інтерполяційний поліном третього ступеня дає хибні значення. Потрібен додатковий пошук адекватної математичної моделі.

Апроксимація поліномом четвертого ступеня

Поліном четвертого ступеня для апроксимації потрібного характеру реологічних властивостей, здатності ВВС у якості палива до протікання, обра-

но у вигляді

$$\eta(t) = a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + f, \quad (4)$$

де a, b, c, d, f – відповідні невідомі коефіцієнти.

При апроксимації за методом найменших квадратів отримано значення коефіцієнтів: $a = 3,735 \cdot 10^{-9}$; $b = -9,347 \cdot 10^{-7}$; $c = 1,317 \cdot 10^{-4}$; $d = -1,287 \cdot 10^{-2}$; $f = 7,018 \cdot 10^{-1}$. При цьому, величина достовірності апроксимації складає: $R^2 = 0,9955$.

Залежність (4) проілюстровано на рис. 2 графіками позначеними $y(t) = \eta_4et(t)$. Вираз (4) з відповідними значеннями коефіцієнтів найкраще й найточніше з формул (1, 2, 4) відображає характер зміни густини палива від температури. Практично апроксимаційна крива $y(t) = \eta_4et(t)$ співпадає зі значеннями кривої рис. 1.

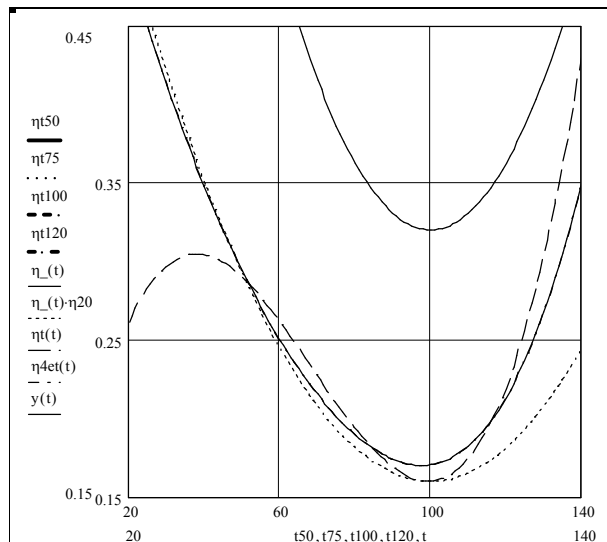


Рис. 2. Графіки інтерполяції та апроксимації густини ВВС у залежності від температури

Задовільні результати апроксимації дозволяють прийняти вираз (4) як адекватний стосовно реологічних властивостей палива. Здатність ВВС до протікання можливо моделювати із застосуванням методів ідентифікації параметрів. Найцікавіше простежити поведінку оптимальних значень густини та температури.

Моделювання впливу параметрів на оптимальні значення густини та температури

При відхиленні параметру a у діапазоні $a = 3 \cdot 10^{-9} \dots 5,3 \cdot 10^{-9}$ відповідним чином змінюватиметься положення мінімального значення густини ВВС. Припустимо, що саме

$$y_{\min}(t) = \eta_{\text{topt}}(t) \Rightarrow t_{\text{opt}} = \arg \min_t y(t). \quad (5)$$

Знайдемо аналітичний вираз кривої, котра відповідатиме умовам (5), що проходитиме точками мінімумів при зміні визначального параметру a , за допомогою методу застосованого у роботах [4, 5]. Тобто розглядається модель впливу параметру для однопараметричного сімейства кривих

$$\eta_t = \eta_t(t, a). \quad (6)$$

З необхідної умови існування екстремуму для залежності (6)

$$\frac{\partial \eta_t(t, a)}{\partial t} = y'_t(t, a) = 0 \quad (7)$$

маємо

$$a_{\text{opt}}(t) = \varphi(t). \quad (8)$$

Тоді

$$\eta_{\text{topt}}(t) = \eta_t(t, a_{\text{opt}}(t)) = y_{\text{opt}}(t, a(t)). \quad (9)$$

Для випадку (4) за формулою (7)

$$\frac{\partial \eta_t(t, a)}{\partial t} = 4 \cdot a \cdot t^3 + 3 \cdot b \cdot t^2 + 2 \cdot c \cdot t + d = 0. \quad (10)$$

Звідки для (8)

$$a_{\text{opt}}(t) = -\frac{1}{4} \cdot \frac{(3 \cdot b \cdot t^2 + 2 \cdot c \cdot t + d)}{t^3}. \quad (11)$$

Для залежності (9) отримуємо

$$\eta_{\text{topta}}(t) = a_{\text{opt}}(t) \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + f. \quad (12)$$

У випадку зміни параметру b , коли діапазон $b = -10,5 \cdot 10^{-7} \dots 5,3 \cdot 10^{-7}$, процедури подібні до (7) – (9) дають: рівняння (10), звідки

$$b_{\text{opt}}(t) = -\frac{1}{3} \cdot \frac{(4 \cdot a \cdot t^3 + 2 \cdot c \cdot t + d)}{t^2}; \quad (13)$$

$$\eta_{\text{toptb}}(t) = a \cdot t^4 + b_{\text{opt}}(t) \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + f. \quad (14)$$

При $c = 1,2 \cdot 10^{-4} \dots 1,8 \cdot 10^{-4}$, буде

$$c_{\text{opt}}(t) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{(4 \cdot a \cdot t^3 + 3 \cdot b \cdot t^2 + d)}{t}; \quad (15)$$

$$\eta_{\text{toptc}}(t) = a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c_{\text{opt}}(t) \cdot t^2 + d \cdot t + f. \quad (16)$$

Аналогічно для зміни параметру d

$$d_{\text{opt}}(t) = -(4 \cdot a \cdot t^3 + 3 \cdot b \cdot t^2 + 2 \cdot c \cdot t); \quad (17)$$

$$\eta_{\text{toptd}}(t) = a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d_{\text{opt}}(t) \cdot t + f. \quad (18)$$

Впливу параметру f на оптимальні значення густини ВВС немає.

За результатами розрахункового експерименту за (5) – (18) побудовано графіки показані на рис. 3. Однопараметричні сімейства кривих отримано для значень параметрів:

$$a = 3 \cdot 10^{-9}; 3,35 \cdot 10^{-9}; 4,3 \cdot 10^{-9}; 5,3 \cdot 10^{-9};$$

$$b = -10,5 \cdot 10^{-7}; -5 \cdot 10^{-7}; 0; 5,3 \cdot 10^{-7};$$

$$c = 1,2 \cdot 10^{-4}; 1,4 \cdot 10^{-4}; 1,6 \cdot 10^{-4}; 1,8 \cdot 10^{-4}.$$

На рис. 3 відповідні до змін параметрів криві $\eta_t = \eta_t(t, a)$ позначені так: $y_{a1}(t), \dots, y_{a4}(t)$; для b та c : $y_{b1}(t), \dots, y_{b4}(t)$; $y_{c1}(t), \dots, y_{c4}(t)$.

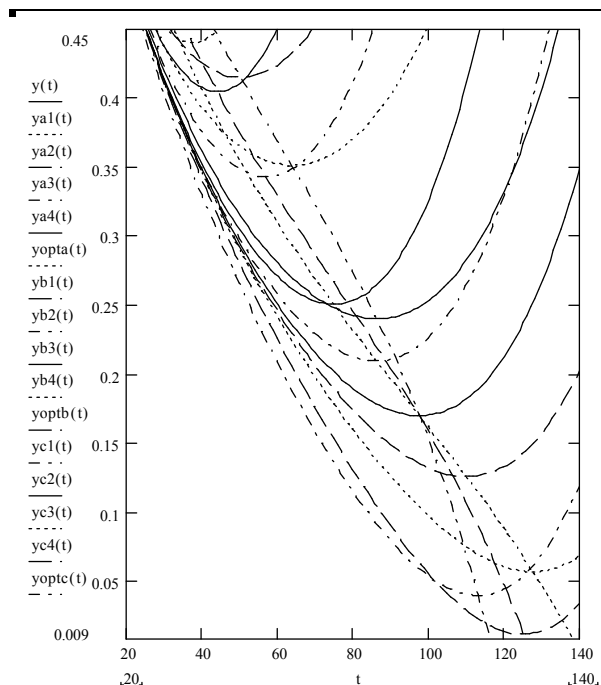


Рис. 3. Зміна оптимальних значень густини ВВС у залежності від температури та визначальних параметрів

У робочому діапазоні температур ВВС застосованих у якості палив для ДВЗ помітна близькість характеру зміни оптимальних значень, що можливо простежити за кривими $y_{opta}(t)$, $y_{optb}(t)$, $y_{optc}(t)$, які перетинаються у точці оптимального значення для базової залежності $y(t)$, отриманої на підставі обробки експериментальних даних [3].

При зміні параметру a , у районі точки перетину кривих оптимальних значень, для діапазону температур $t = 80 \dots 120$ °C, спостерігається найповільніша зміна оптимальної густини ВВС, крива $y_{opta}(t)$. Найшвидше змінюються оптимальні значення за кривою $y_{optc}(t)$.

Таким чином параметр c може ідентифікувати, наприклад, посилені розчинні властивості присадок до ВВС. Роль абсолютного розчинника, що не потребує підвищення температури для зменшення густини палива у даній постановці моделюється впливом параметру f .

Однак, для заданої оптимальної густини, при незмінних інших умовах, у діапазоні температур

$t = 20 \dots 100$ °C, використання домішок, що впливають на параметр a , потребують менших енерговитрат пов'язаних із підігрівом ВВС.

Утримання густини палива на прийнятному рівні можливе із залученням графіків поданих на рис. 4 та 5.

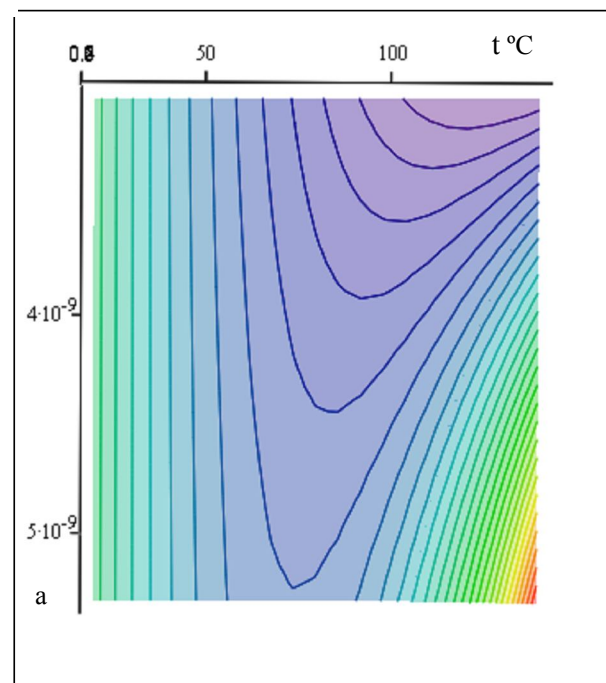


Рис. 4. Зміна густини ВВС у залежності від температури та параметру a

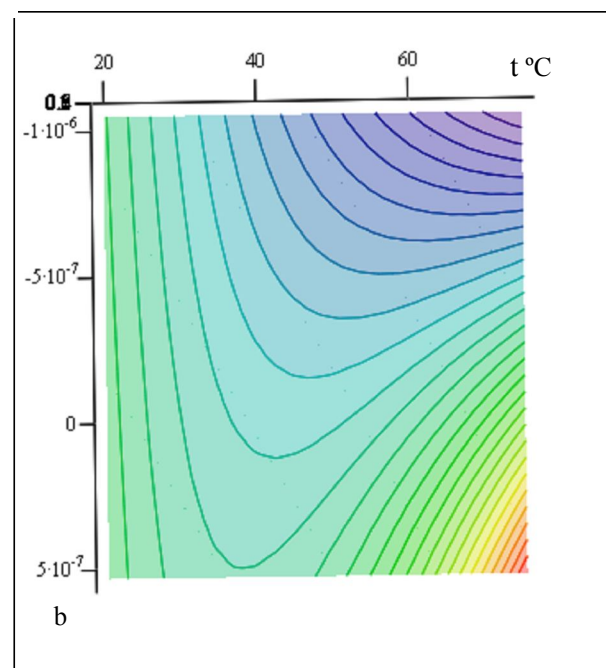


Рис. 5. Зміна густини ВВС у залежності від температури та параметру b

З відповідних значень необхідних параметрів, а також з урахуванням певних обмежуючих факторів, за діаграмами рис. 4, 5 легко простежити області для застосування підігріву при використанні параметру a (рис. 4) та b (рис. 5).

У будь-якому разі, економія палива на підігріві того ж таки палива в наслідок оптимізації вжитих заходів є очевидним вирашем в умовах енергетичної кризи, коли дедалі відчутнішим стає дефіцит нафтових сортів палива.

Моніторинг та підтримання технічного стану суднових енергетичних установок, та, насамперед головних СДВЗ відбуваються в умовах багатоальтернативних ситуацій. Скоріш за все особою, що приймає рішення про застосування того чи іншого виду палива, до розгляду буде прийнято не лише аспекти економічного плану. Екологічні показники роботи СДВЗ стають усе більш важливими.

Економічності двигуна – питома витрата палива, доповнюється вартісною оцінкою технічної досконалості енергетичного обладнання, його надійності, витратами на покращення якості палива, яке використовується та вдосконалення конструкцій двигунів.

Вибір альтернативного варіанту техніко-економічної поведінки залишається за людиною, тому надзвичайно важливим є врахування суб'єктивних переваг при опрацюванні науково обґрунтованих рішень. Такий підхід розвивається з огляду на оптимальність формування рейтингів та множин досяжних для суб'єкта альтернатив [5 – 7].

Шляхи впровадження вугільнопаливних двигунів повинні враховувати зношуваність їхніх елементів. У випадку оптимізації застосування ВВС пріоритетним напрямком у подоланні негативних наслідків зношування має бути віддання переваги заходам, які спрямовані на забезпечення реологічних властивостей палива з урахуванням зміни показників надійності. На рис. 4 та 5 лінії постійних рівнів густини показують полоси прийнятних діапазонів температур. Для $\eta_a = \eta_t(t, a)$ та $\eta_b = \eta_t(t, b)$ спостерігаються зміни подібного характеру але при різних абсолютних значеннях визначальних параметрів. Густина $\eta_a = \eta_t(t, a)$ значно більш чутлива ніж $\eta_b = \eta_t(t, b)$.

Висновки

Проведено параметричні дослідження та числовий експеримент стосовно реологічних властивостей ВВС для їхнього застосування у суднових двигунах внутрішнього згоряння. Складено адекватну математичну модель виразу для приблизної оцінки реологічних властивостей ВВС. Простежено характер змін оптимальних значень густини залежно від параметрів моделі. Величина достовірності апроксимації склала: $R^2 = 0,9955$.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямку передбачають залучення методів параметричної ідентифікації, оптимізації з урахуванням варіаційного принципу віддання суб'єктивних переваг із залученням суб'єктивної ентропії. Очікуваним є економічний ефект від раціональної витрати альтернативних палив на морських транспортних судах.

Література

1. Белоусов Е.В. Создание и совершенствование твердотопливных поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография / Е.В. Белоусов. – Херсон: ОАО «ХГТ», 2006. – 452 с.
2. Siebers D.L. The Autoignition and Combustion of Coal-Water Slurry Under Simulated Diesel Engine Conditions / D.L. Siebers, T.M. Dyer // ASME Transaction: Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1986. – Vol. 108, № 3. – P. 652-660.
3. Иващенко Н.А. Исследование распыливания угольных суспензий и интенсификация их сжигания в дизеле / Н.А. Иващенко, Л.В. Грехов // Автомобильные и тракторные двигатели: межвуз. сб. науч. тр. МАМИ. – 1999. – Вып. XV. – С. 214-225.
4. Гончаренко А.В. Дослідження характеристики двигуна стосовно зміни оптимальних значень / А.В. Гончаренко // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон: Херсонський державний морський інститут, 2009. – Т. 4. – С. 45-48.
5. Гончаренко А.В. Керування підтриманням безпеки польотів через технічні та витратні чинники: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.03. / А.В. Гончаренко. – К., 2005. – 198 с.

6. Касьянов В.А. Субъективный анализ: монография / В.А. Касьянов. – К.: НАУ, 2007. – 512 с.

7. Вплив суб'єктивних переваг на показники роботи суднової енергетичної установки /

А.В. Гончаренко // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 2 (22). – С. 105-111.

Надійшла до редакції 19.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедри судових енергетичних установок Б.В. Малигін, Херсонський державний морський інститут, Херсон.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А.В. Гончаренко

Приведен аналитический обзор экспериментальных исследований по реологическим характеристикам водоугольных суспензий. Внимание уделено впервые выявленной Siebers D.L. и Dyer T.M. в 1986 году аномальной зависимости нормальной вязкости топлива от температуры его подогрева. Составлена математическая модель влияния параметров на изменение вязкости водоугольных суспензий. Выполнена интерполяция полиномом третьей степени и аппроксимация полиномом четвертой степени. Прослежено изменение оптимальных значений вязкости в зависимости от изменения определяющих параметров. Проведены расчетные эксперименты. Построены соответствующие графики зависимости вязкости от изменения температуры и определяющих параметров.

Ключевые слова: водоугольные суспензии, вязкость топлива, твердотопливные поршневые двигатели, судовые двигатели внутреннего сгорания, реологические характеристики, температура топлива, определяющие параметры, оптимальные значения.

ANALYSIS OF PARAMETRIC RESEARCHES ON REOLOGIC PROPERTIES OF COAL-WATER SLURRY FOR THE USE IN SHIPS' INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A.V. Goncharenko

The state-of-the-art review of experimental researches on reologic characteristics of coal-water slurry is resulted. Attention is paid to the abnormal dependence, first discovered by Siebers D.L. and Dyer T.M. in 1986, of the normal viscosity of fuel oil on its temperature of heating. It is composed a mathematical model of parameters influence upon a coal-water slurry viscosity change. Interpolation with the help of the third power polynomial dependence and approximation with the fourth power polynomial dependence are made. It is traced a change of the viscosity optimal values depending on the change of the determined parameters. Calculation experiments are conducted. Plotted corresponding diagrams of a dependence of the viscosity on a temperature and determined parameters change.

Key words: coal-water slurry, fuel oil viscosity, coal-fueled piston engines, ships' internal combustion engines, reologic characteristics, fuel oil temperature, determined parameters, optimal values.

Гончаренко Андрій Вікторович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедру судових енергетичних установок Херсонського державного морського інституту, Херсон, Україна, e-mail: andygoncharenko@yahoo.com.