

## СПРОЩЕНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ ЗА УМОВ ЛАМІНАРНОЇ ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН В КРУГЛИХ ТРУБАХ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Числовий аналіз показав, що спрощений метод оцінки інтенсивності теплообміну за умов ламінарної течії неньютонівських рідин в круглих трубах дає результати з незначним відхиленням від результатів існуючого методу. Ці результати корисні для оцінки інтенсивності теплообміну в областях в'язкісно-гравітаційного і перехідного режиму течії неньютонівської рідини в каналах за умов застосування експериментально розрахункового методу.

**Ключові слова:** коефіцієнт тепловіддачі, не ньютонівська рідина, умовна в'язкість, реологічні властивості.

### Abstract

Numerical analysis showed that the simplified method for estimating the intensity of heat transfer under conditions of laminar flow of non-Newtonian fluids in circular pipes produces results with a slight deviation from the results of the current method. These results are useful for measuring the intensity of heat exchange in the areas viscosity gravity-flow regime transition and non-Newtonian fluid in the channels when used experimentally calculation method

**Keywords:** heat transfer coefficient, non-Newtonian fluid, conditional viscosity, rheology properties.

Дослідження відносяться до прогнозування інтенсивності теплообміну в складних рідинах за умов їх течії в гладких трубах.

Процес тепловіддачі за умов течії рідини в трубах є більш складним в порівнянні з процесом тепловіддачі за умов омивання поверхні необмеженим потоком. Поперечний переріз труби має кільцеві розміри. А отже, починаючи з деякої відстані від входу, рідина по всьому поперечному перерізу труби відчуває гальмуючу дію сил в'язкості, відбувається зміна температур рідини як по перерізу так і по довжині каналу. Все це відбивається на тепловіддачі [1].

Мета розширення достовірності застосування ЕРМ для визначення інтенсивності теплообміну в складних сумішах.

Тепловіддача за умов гідродинамічно і термічно стабілізованої ламінарної течії в гладких трубах круглого поперечного перерізу може бути розрахована за аналітично одержаною залежністю  $Nu_d \approx 4,36$  при  $q_c = \text{const}$ . При  $t_c = \text{const}$  згідно теорії  $Nu_d \approx 3,66$ . Значення  $Nu$  одержано за умов параболічного розподілення швидкостей.

Якщо довжина труби більше довжини початкової теплової ділянки і теплообмін має місце з початку труби, середні коефіцієнти тепловіддачі за умов в'язкої течії для ньютонівської рідини можуть бути визначенні за рівнянням [1].

$$\overline{Nu} = 1,55 \left( \text{Pe} \frac{d}{L} \right)^{1/3} (\mu_c / \mu_p)^{-0,14} \varepsilon_1, \quad (1)$$

$$\text{де } \text{Pe} = \frac{wl}{a},$$

де  $w$  – швидкість рідини, м/с;  $l$  – визначальний розмір, м;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $d$  – діаметр трубопроводу, м;  $L$  – довжина трубопроводу;  $\mu_c$  – динамічна в'язкість рідини при температурі стінки, Па·с;  $\mu_p$  – динамічна в'язкість рідини при температурі рідини, Па·с.

Середнє число Нуссельта без врахування дисипації енергії руху для неньютонівської рідини[2]

$$\overline{Nu}^{nis} = 1,572 \left( \delta Pe \frac{d}{L} \right)^{1/3} \left\{ 1 - \exp \left[ \begin{array}{l} 1,87a \left( \frac{1}{Pe} \frac{L}{d} \right)^{0,12} - \\ - 2,35 \left( \frac{1}{Pe} \frac{L}{d} \right)^{-0,03} \end{array} \right] \right\} \left( \frac{\mu_m^*}{\mu_\omega^*} \right)^v, \quad (2)$$

де  $\delta = (m + 1)/4\omega(1 - a)$  ;

$$\bar{\omega} = a^2 + 2a(1 - a) \frac{m + 1}{m + 2} + (1 - a)^2 \frac{m + 1}{m + 3} ;$$

$$v = 0,14m + (0,46 + 0,38 \lg m)a ;$$

$$\left( \frac{\mu_m^*}{\mu_\omega^*} \right) = \left( \frac{\mu_0^*}{\mu_\omega^*} \right)^{n'}$$

де  $n' = A \left( \lg Pe \frac{d}{L} - 1 \right)^{1/3} + C$  ;

$$A = 0,57m^{-1,065} - 0,71m^{-1,355}a ;$$

$$C = 0,3 - 0,028m + (0,113 + 0,133m)a .$$

Нижче покажемо на конкретному прикладі з неньютонівською рідиною (модель Гершеля-Балклі), що застосувавши поняття " уявної в'язкості " ( $\mu_{уяв} = \tau / \dot{\gamma}$ ), дозволяє замість складної залежності (2) застосовувати – (1).

Приклад. Вихідні дані: витрата охолоджуючої неньютонівської рідини  $G = 200$  кг/год = 0,056 кг/с, температура рідини на вході в холодильник  $t_0 = 100$  °С, необхідна температура рідини після холодильника  $t_{к.з} = 85$  °С, температура холодоагента (вода) на вході в холодильник  $t_b = 18$  °С, реологічні і теплофізичні константи неньютонівської рідини:  $E_0/R = 2041,2$  К,  $E/R = 7057,8$  К,  $k_0 = 0,0709$  Па,  $k_1 = 0,000064$  Па·с<sup>1/m</sup>,  $m = 1,86$ ,  $\rho_{20} = 936$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_{20} = 0,1474$  Вт/(м·К),  $Cp_{20} = 2122,9$  Дж/(кг·К),  $\beta = 0,00059$  К<sup>-1</sup>,  $\alpha = 0,0017$  К<sup>-1</sup>,  $\gamma = 0,00238$  К<sup>-1</sup>.

Рівняння, відоме в літературі як модель Гершеля-Балклі, в термінах одновимірного зсуву має вигляд

$$\tau = \tau_0 + k \left| \dot{\gamma} \right|^{1/m-1} \dot{\gamma}. \quad (3)$$

Реологічне рівняння з врахуванням температурної залежності  $\tau_0$  і  $k$

$$\tau = k_0 \exp(E / RT) + k_1 \left| \dot{\gamma} \right|^{1/m-1} \exp(E / RT), \quad (4)$$

застосовано для визначення рівняння (3) за умов сталої температури  $t = \text{const}$ .

За результатами розрахунків одержали наступні результати:

- методика (Фройштетера Г. Б.) розрахунку безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі  $Nu$  від неньютонівської рідини (модель Гершеля- Балклі) –  $\overline{Nu}^{nis} = 4,6$ ;
- запропонована методика, з використанням поняття «уявна в'язкість» і моделі ньютонівської рідини показала, що  $\overline{Nu}^{nis} = 4,7$ ;
- розбіжність < 2,2 %.

Таким чином, в обмеженому діапазоні параметрів застосовування критеріального рівняння теплообміну ньютонівської рідини для неньютонівської можливе.

На наш погляд, в цьому випадку механізми теплообміну в ньютонівській і не ньютонівській рідині збігаються. Результати дослідження приведені не для того, щоб замінити напрацьовані класичні підходи [2-4] для визначення інтенсивності теплообміну за умов ламінарної течії. Ці дослідження потрібні для оцінки інтенсивності теплообміну в областях в'язкістно-гравітаційного і перехідного режиму течії неньютонівської рідини в каналах з застосуванням експериментально розрахункового методу (ЕРМ)[5-7].

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва: Энергия, 1969. – 440 с.
2. Фройштетер Г. Б. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах / Г. Б. Фройштетер, С. Ю. Данилевич, Н. В. Радионова. – Киев: Наукова думка, 1990. – 216 с.
3. Смольский Б. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно в'язкопластичных материалов / Б. М. Смольский, З. П. Шульман, В. М. Гориславец. – Минск: Наука и техника, 1970. – 448 с.
4. Шульман З. П. Конвективный тепломассоперенос реологически сложных жидкостей / З. П. Шульман. – Москва: Энергия, 1975. – 352 с.
5. Ткаченко С. Й. Визначення параметрів «віртуальної модельної рідини» для оцінки інтенсивності теплообміну в реальних умовах теплотехнології// С. Й. Ткаченко, Т. Ю. Румянцева, Н. В. Пішеніна // Енергетика Київського політехнічного інституту. – 2014. - № 1. – С. 27 – 34.
6. Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії: монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2011. – 132 с.
7. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі// С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. - № 3. – С. 103 – 110. – ISSN 1997-9266.

**Ярослав Анатолійович Єфремов** — студент групи ТЕ-15м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: yefremov.yaroslav1993@gmail.com;

**Андрій Вікторович Гижко** — студент групи ТЕ-136, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**Станіслав Йосипович Ткаченко** — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Науковий керівник: **Станіслав Йосипович Ткаченко** — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**Yaroslav A. Efremov** — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, e-mail: yefremov.yaroslav1993@gmail.com;

**Andrey V. Gyzhko** — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa.

**Stanislav I. Tkachenko** — Dr. Sc. (Eng), Professor, Head of the Chair of Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa

Supervisor: **Stanislav I. Tkachenko** — Dr. Sc. (Eng), Professor, Head of the Chair of Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa.