

ЗМІНА ГІДРОМЕХАНІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНОСІЯ В ПРИГРАНИЧНОМУ ШАРІ ПІД ДІЄЮ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН (ПАР)

Актуальність та мета дослідження. При вивченні процесів тепло-масообміну важливу роль відіграють різноманітні критерії [1]. Емпіричні критеріальні рівняння, що часто зустрічаються у науковій та довідниковій літературі, несуть на собі потужний експериментальний матеріал і описують багатокомпонентні та багатofакторні системи, які неможливо відобразити аналітично.

Відомо, що гідромеханічні характеристики потоку рідкофазного теплоносія є визначальними для проходження процесів теплообміну в системі стінка трубопроводу-теплоносій. Для ефективної роботи теплообмінної апаратури необхідно, щоб рух теплоносіїв здійснювався в турбулентному режимі. Однак, в пристінній області трубопроводу виникає приповерхневий ламінарний (Л) шар, де концентрується 98 % теплового опору системи стінка-потік теплоносія [2]. Відповідно, середня товщина цього Л шару є визначальною при проходженні кількості тепла в рекуперативній теплообмінній апаратурі.

Нами запропоновано розглядати процес руху рідин в трубопроводах чи апаратах із врахуванням сил поверхневого натягу на межі контакту тверде тіло-рідина [3, 4]. В цих роботах нами введений поверхневий критерій, який в приповерхневому Л шарі набуває великих значень в порівнянні з критеріями Фруда та Рейнольдса (1)

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos\theta}{\mu v_x}, \tag{1}$$

де N – видозмінений критерій Рейнольдса, $N = \frac{v_x \delta \rho}{\mu} = 10,47 - 11,5$ [5, с. 94], μ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с; δ – товщина приграничного Л шару, м; ρ – густина рідини, кг/м³; σ – коефіцієнт поверхневого натягу на межі тверде тіло-рідина, Н/м; $\cos\theta$ – гідрофільність поверхні змочування; v_x – швидкість пристінних шарів рідини, м/с

Цей критерій є дещо подібним до капілярного критерію [1, с. 161], але має інший фізичний зміст. В капілярний критерій входить швидкість піднімання рідини у капілярі в залежності від зміни коефіцієнта та поверхневого натягу та коефіцієнта динамічної в'язкості рідини. В поверхневий критерій входить середня швидкість руху рідини v_x в пристінній області трубопроводу, а також видозмінений критерій Рейнольдса N та гідрофільність поверхні змочування $\cos\theta$.

Такий підхід дав нам можливість вивести нову формулу (2) для розрахунку середньої товщини приграничного Л шару [6]:

$$\delta = \frac{d^2}{Re_\mu} \sqrt{\frac{2\sigma \hat{\eta} s\theta}{\lambda}}, \tag{2}$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу на межі тверде тіло-рідина, Н/м; $\hat{\eta} s\theta$ – гідрофільність поверхні стінки; ρ – густина рідини, кг/м³; d – діаметр живого перерізу потоку, м; λ – коефіцієнт Дарсі;

$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$; l довжина трубопроводу, м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па с; K_T – коефі-

цієнт турбулізації Л шару, $\hat{E}_\Delta = \frac{Re_{\Delta a}}{Re_{\Delta b}}$; $Re_{кр} \approx 2320$.

В роботах [7, 8] запропоновано спосіб підвищення загального коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури шляхом введення в теплоносій малих кількостей ПАР, які здатні суттєво зменшувати коефіцієнт поверхневого натягу теплоносія і мінімізувати середню товщину приповерхневого шару. Оптимальні концентрації природних ПАР (рослинних олій) у молоці, за яких коефіцієнт поверхневого натягу мінімальний, представлені нами в роботі [9].

Для визначення діапазону числових значень поверхневого критерію нами зроблено серію експериментів водних розчинів аніонактивних ПАР. В якості ПАР використовувались натрій лаурилсульфат,

та натрій алкансульфонат.

Важливою характеристикою ПАР є критична концентрація міцелоутворення (ККМ). Визначення ККМ ґрунтується на різкій зміні фізико-хімічних властивостей ПАР (коефіцієнта поверхневого натягу, еквівалентної електропровідності, показника заломлення та ін.). Для визначення ККМ здійснювали вимірювання коефіцієнтів поверхневого натягу водних розчинів вибраних ПАР. На кривій залежності коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації, в області ККМ є екстремум, рис. 1, 2. Цей екстремум є точкою ККМ. Точка ККМ для натрій лаурилсульфату спостерігається при концентрації 0,202 мас.%, в якій коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 1,85 рази. Для натрій алкансульфонату ККМ спостерігається при концентраціях 0,18 мас.%. При цій концентрації коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 2,05 рази. Як видно з графіків, при незначному зростанні концентрацій ПАР, коефіцієнт поверхневого натягу різко зменшується до значення ККМ, а при концентраціях вище ККМ постерігається незначне його зменшення. Так, для натрій лаурилсульфату при концентрації 0,505 мас.% коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 1,92 рази. При концентрації 0,712 мас.% натрій алкансульфонату коефіцієнт поверхневого натягу зменшується в 2,15 рази. Однак, для розрахунків ми вибирали значення, за яких зміна коефіцієнта поверхневого натягу максимальна, а концентрацію при даних значеннях вважали оптимальною. При цих значеннях концентрацій вибирали і значення для коефіцієнта динамічної в'язкості.

Коефіцієнт поверхневого натягу визначали методом максимального тиску бульбашки (метод Ребіндера). Для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості розчинів використовували метод віскозиметрії.

На рис. 1–2 показані залежності коефіцієнта поверхневого натягу та коефіцієнта динамічної в'язкості від концентрації ПАР.

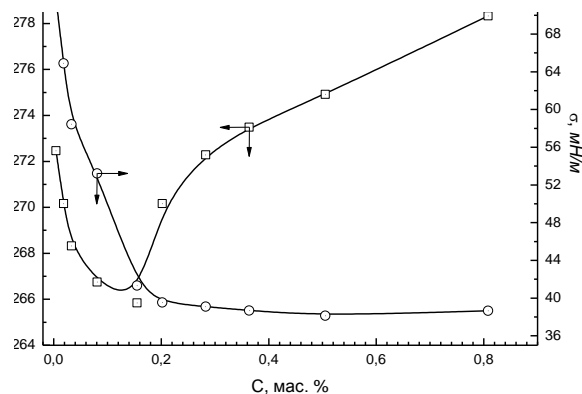


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу σ та коефіцієнта динамічної в'язкості μ від концентрації натрій лаурилсульфату у воді

Рідина з меншим значенням коефіцієнта поверхневого натягу краще змочує поверхню твердого тіла. При цьому кут змочування стає більш гострим. Для визначення кута змочування використовували установку, яка дозволяє проектувати краплю на екран. Вимірявши основні розміри краплі (висоту, діаметр), розраховували кут змочування. На рис. 3 показано залежність косинуса кута змочування від концентрації ПАР.

Оскільки в поверхневий критерій входить середня товщина приграничного Л шару, то обчислювали її значення для води і для оптимальних концентрацій водних розчинів ПАР. Для цього у формулу (2) підставляли характеристики для води при температурі 10^0 С.

Середня швидкість руху рідин в трубопроводах на підприємствах харчової, фармацевтичної та переробної промисловостей становить $v \approx 1 \text{ м} / \text{с}$, діаметр трубопроводу $d = 21 \cdot 10^{-3}$ м, довжина трубопроводу $l = 3$ м. При цьому швидкість в пристінних шарах $v_x \approx 0,1 \text{ м} / \text{с}$.

Середня товщина приграничного Л шару

– для води за формулою (2):

$$\delta = \frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{16470,58 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 7,325 \cdot 10^{-2} \cdot 0,866 \cdot 1000}{2,789 \cdot 10^{-2} \cdot 3}} = 116 \cdot 10^{-6} \text{ м} ;$$

– для води + (0,505÷0,510) мас.% натрій лаурилсульфату за формулою (2):

$$\delta = \frac{\frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{16470,58 \cdot 1,275 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,812 \cdot 10^{-3} \cdot 0,963 \cdot 1000}{2,789 \cdot 10^{-2} \cdot 3}}}{\frac{16470,58}{2320}} = 87 \cdot 10^{-6} \text{ і} ;$$

– для води + (0,712÷0,720) мас.% натрій алкансульфонату за формулою (2):

$$\delta = \frac{\frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{16483,52 \cdot 1,274 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,971 \cdot 1000}{2,788 \cdot 10^{-2} \cdot 3}}}{\frac{16483,52}{2320}} = 83 \cdot 10^{-6} \text{ і} .$$

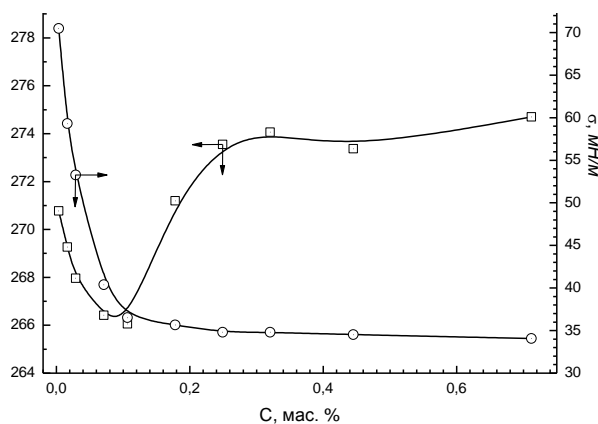


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу σ та коефіцієнта динамічної в'язкості μ від концентрації натрій алкансульфонату у воді.

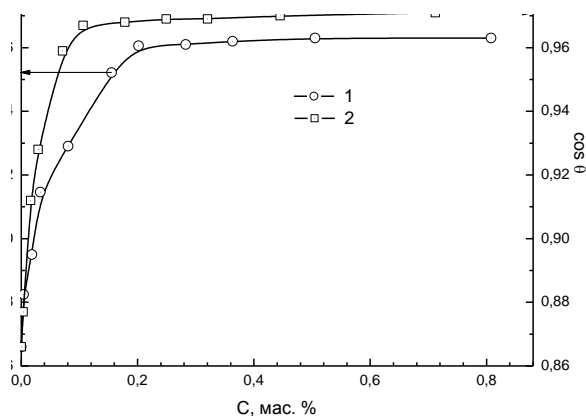


Рисунок 3 – Залежність кута змочування від концентрації ПАР
1– натрій лаурилсульфат, 2 – натрій алкансульфонат

Отже, товщини Л шару під дією ПАР зменшились в 1,33 та 1,4 рази відповідно.

Швидкість в пристінних шарах знаходили з видозміненого критерію Рейнольдса, приймаючи значення $N=10,5$ (формула 1).

Середня швидкість приграничного Л шару:

– для води

$$v_x = \frac{10,5 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}}{1,16 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 0,116 \text{ [і / н]};$$

– для води + (0,505÷0,510) мас.% натрій лаурилсульфату

$$v_x = \frac{10,5 \cdot 1,275 \cdot 10^{-3}}{8,762 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 0,153 \text{ [і / н]};$$

– для води + (0,712÷0,720) мас.% натрій алкансульфонату

$$v_x = \frac{10,5 \cdot 1,274 \cdot 10^{-3}}{8,33 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 0,160 \text{ [і / н]}.$$

Отже, зі зменшенням товщини приграничного Л шару швидкість в ньому зростає і це інтенсифікує проходження кількості тепла через нього. Також енергія зв'язку між стінкою трубопроводу і приповерхневим шаром води зменшується, мінімізується «прилипання» рідини до стінок. Оскільки середня товщина Л шару суттєво залежить від коефіцієнта поверхневого натягу рідини, то і швидкість в приповерхневих шарах також залежить від нього.

Розглянемо переріз потоку в трубопроводі при турбулентному (Т) режимі руху рідини. Вектори швидкостей в ньому розподіляються подібно до параболи, але з більш широкою вершиною. Однак, при Т режимі біля стінок існує приграничний Л шар товщиною δ . Внаслідок взаємного тертя та «прилипання» рідини до стінок, швидкість руху потоку v_x біля самої стінки прямує до нуля і при віддаленні від стінки збільшується.

Оскільки при зменшенні товщини цього приграничного Л шару швидкість в пристінній області зростає, то крива розподілу векторів швидкостей в цій області буде зростати швидше (рис. 4)

Визначали числові значення поверхневого критерію

$$\text{– для води } P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{1}{10,5} \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 73,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,866}{1,29 \cdot 10^{-3} \cdot 0,116} = 253,54;$$

– для води + (0,505÷0,510) мас.% натрій лаурилсульфату

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{1}{10,5} \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 38,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,963}{1,275 \cdot 10^{-3} \cdot 0,153} = 112,56;$$

– для води + (0,712÷0,720) мас.% натрій алкансульфонату

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu v_x} = \frac{1}{10,5} \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 34,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,971}{1,274 \cdot 10^{-3} \cdot 0,161} = 96,39.$$

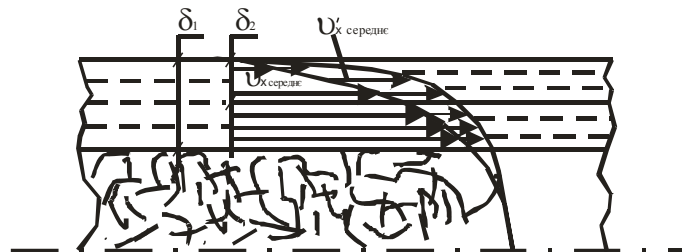


Рисунок 4 – Розподіл векторів швидкостей у приграничному Л шарі

Числовий діапазон поверхневого критерію для досліджуваних ПАР становить 96,39–112,56.

Отже, при малих концентраціях ПАР суттєво зменшується коефіцієнт поверхневого натягу теплоносія, середня товщина приповерхневого шару є мінімальною, середня швидкість в цьому шарі є максимальною, а числове значення поверхневого критерію – мінімальне.

На рис. 5 показано залежність поверхневого критерію від концентрацій натрій лаурилсульфату та натрій алкансульфонату у воді.

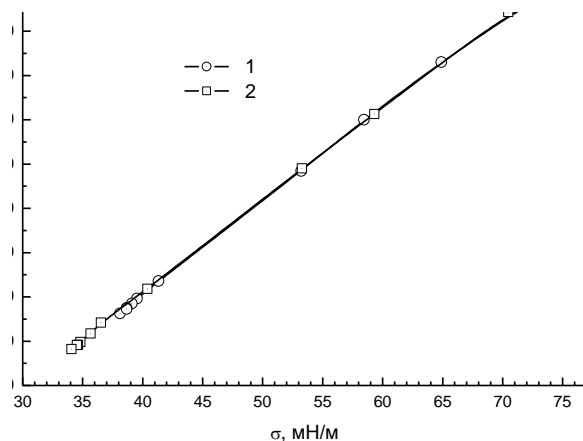


Рисунок 5 – Залежність поверхневого критерію від концентрацій
1 – натрій лаурилсульфату, 2 – натрій алкансульфонату

Оскільки всі значення поверхневого критерію P_0 лежать на прямій і накладаються, то такої залежності, вимірявши коефіцієнт поверхневого натягу σ після введення ПАР у теплоносії, можна визначити поверхневий критерій та швидкість у приповерхневому шарі U_x .

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu U_x} = \frac{\mu}{U_x \delta r} \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu U_x} = \frac{2\pi\sigma \cos \theta}{\mu U_x^2}. \quad (3)$$

Дослідження числового діапазону поверхневого критерію неіоногенних ПАР водних розчинів, а також природних ПАР (рослинних олій) у молоці буде предметом подальших досліджень.

Висновки

1. Знайдено числовий діапазон поверхневого критерію (96,39–112,56) для водних розчинів досліджуваних ПАР. Показано, що мінімальне значення поверхневого критерію спостерігається при оптимальних концентраціях ПАР.

2. Зменшення коефіцієнта поверхневого натягу мінімізує товщини приграничних шарів у системі стінка трубопроводу-вода у 1,33 та 1,4 рази, відповідно, та збільшує середні швидкості в цих приграничних Л шарах.

3. Оптимальні кількості натрій лаурилсульфату та натрій алкансульфонату у воді зменшують коефіцієнт поверхневого натягу у 1,92 та 2,15 рази, відповідно.

Література

1. Минаковский В. М. Обобщенные переменные теории переноса. /В.М. Минаковский – К. : «Вища школа», 1978. – 179с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. [пер. с нем.]. – М. : Наука, 1974. – 711 с.
3. Білонога Ю.Л. Про доцільність розгляду гідромеханічних процесів з урахуванням сил поверхневого натягу на границі контакту тверде тіло-рідина / Ю.Л. Білонога // Ж. Інтегровані технології та енергозбереження. – 2006. – №2. – С. 56–64.
4. Білонога Ю.Л. Інтенсифікація та оптимізація тепломасообмінних процесів при виробництві органопрепаратів і переробці вторинної сировини м'ясокомбінатів: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец.05.18.12»Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Ю.Л. Білонога – Одеса, 2006. – 36 с.

5. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 767 с.

6. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р., Ціж Б.Р., Варивода Ю.Ю. Підвищення коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури при використанні ПАР Ю.Л Білонога, О.Р. Максисько, Б.Р. Ціж, Ю.Ю. Варивода // Науковий вісник Львівської державної академії ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького. – 2004. – Т.6, №2. – Ч.3. – С. 126–131.

7. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р. Підвищення коефіцієнта теплопередачі кожухотрубного теплообмінника при тепловій обробці молока / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2005. – Випуск 38. – С. 82–85.

8. Кравців Р.Й. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р., Занічковська Л.В. Спосіб інтенсифікації теплопередачі в системі холодоносій (вода) – стінка теплообмінника-молоко. Подана заявка. У 2008 № 15169 від 29.12.2008.

9. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р. Оптимізація концентрацій рослинних поверхнево-активних речовин (ПАР) в молоці для інтенсифікації теплопередачі в системі стінка теплообмінника-потік / Ю.Л. Білонога, О.Р. Максисько // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – Випуск № 32. – С. 200–204.

УДК 664.661.12.] 021.3

Билонога Ю.Л., Максисько О.Р.

**ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПРИГРАНИЧНОМ СЛОЕ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (ПАВ)**

В статье показаны изменение гидромеханических и теплофизических характеристик теплоносителя, который движется в трубе или аппарате, а именно, в приграничном слое под действием анионных поверхностно-активных веществ (ПАВ). Экспериментально определены оптимальные концентрации исследуемых ПАР в воде, при которых коэффициент поверхностного натяжения минимальный. Показано, что уменьшение коэффициента поверхностного натяжения минимизирует толщину приграничного L слоя в системе стенка трубопровода-вода, а значит, увеличивает среднюю скорость потока в нем. Найден числовой диапазон поверхностного критерия для водных растворов исследуемых ПАВ. Минимальное значение поверхностного критерия наблюдается при оптимальных концентрациях ПАВ.

Bilonoha Y.L., Maksysko O.R.

**A CHANGE OF HYDROMECHANICAL AND HEATING PHYSICAL CHARACTERISTICS OF
HEAT-CARRYING AGENT IN BY LIMITING LAYER UNDER THE ACTION
OF SURFACTANTS**

The article deals with the change of hydromechanical and heating physical characteristics of heat-carrying agent, that move in tube of apparatus, namely, in by-limiting layer under the action of anionic surfactants. It was found out experimentally the optimal concentrations steam, which are investigated in water, the coefficient of surface tension was minimal. It was also shown that a reduce of surface tension coefficient minimize a thickness of by-limiting L layer in system of pipeline – water wall, it means that it increase an average speed of stream in this L layer. Numerical range of surface criterion for water solution surfactants. Were found out and are investigating. Minimal meaning of surface criterion are observed at optimal concentrations surfactants.