



УДК 664.002.5(075)

Вплив поверхнево-активних речовин на поверхневий критерій в ламінарному приграничному шарі

Ю.Л. Білонога¹, О.Р. Максисько¹, І.Г. Свідрак²
yuriy_bilonoha@ukr.net

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького,
вул. Пекарська, 50, м. Львів, 79010, Україна;

²Львівський національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна;

Показано, що на межі потік теплоносія – стінка трубопроводу, тобто в межах ламінарного приграничного шару (ЛПШ), виникає потужне поле сил поверхневого натягу. Інтенсивність поверхневих сил характеризується поверхневим критерієм. Експериментально знайдено значення коефіцієнта поверхневого натягу σ , косинуса кута змочування $\cos\theta$ та динамічного коефіцієнта в'язкості μ водних розчинів під впливом поверхнево-активних речовин (ПАР). До водних розчинів додавались найбільш поширені аніонна, неіонна та катіонна ПАР. Визначені оптимальні концентрації цих ПАР до «льодяної» води. Встановлено, що за оптимальних концентрацій ПАР значення поверхневого натягу є мінімальним. Обчислено середню товщину ламінарного приграничного шару за додавання до води оптимальних концентрацій досліджуваних ПАР. Встановлено, що зменшення коефіцієнта поверхневого натягу мінімізує товщину ЛПШ у системі стінка трубопроводу-вода. Показано, що середня швидкість в пристінних шарах за додавання оптимальних концентрацій досліджуваних ПАР зростає, і як наслідок така система здатна ефективніше передавати кількість тепла. Визначено числові діапазони поверхневого критерію для «льодяної» води за додавання різного виду ПАР.

Ключові слова: ламінарний приграничний шар, середня товщина приграничного ламінарного шару, поверхневий натяг, поверхнево-активні речовини, швидкість в ламінарному приграничному шарі, оптимальні концентрації, поверхневий критерій.

Влияние поверхностно-активных веществ на поверхностный критерий в ламинарном пограничном слое

Ю.Л. Билонога¹, О.Р. Максисько¹, І.Г. Свідрак²
yuriy_bilonoha@ukr.net

¹Львовский национальный университет ветеринарной медицины и биотехнологий имени С.З. Гжицкого,
ул. Пекарская, 50, г. Львов, 79010, Украина;

²Львовский национальный университет «Львовская политехника»,
ул. Степана Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина;

Показано, что на границе поток теплоносителя – стенка трубопровода, то есть в пределах ламинарного пограничного слоя (ЛПШ), возникает мощное поле сил поверхностного натяжения. Интенсивность поверхностных сил характеризуется поверхностным критерием. Экспериментально найдено значение коэффициента поверхностного натяжения, косинуса угла смачивания и динамического коэффициента вязкости водных растворов под влиянием поверхностно-активных веществ (ПАВ). К водным растворам добавлялись наиболее распространенные анионная, неионная та катионная ПАВ. Определены оптимальные концентрации этих ПАВ к «ледяной» воде. Установлено, что при оптимальных концентрациях ПАВ значение поверхностного натяжения является минимальным. Вычислено среднюю толщину ЛПШ за добавление к воде оптимальных концентраций исследуемых ПАВ. Установлено, что уменьшение коэффициента поверхностного натя-

Citation:

Bilonoha, Y.L., Maksysko, O.R., Svidrak, I.G. (2017). Effect of surfactants on surface criteria in laminar boundary layer. *Scientific Messenger LNUVMBT named after S.Z. Gzhytskyj*, 19(75), 8–12.

жения минимизирует толщины ЛПШ в системе стенка трубопровода-вода. Показано, что средняя скорость в пристенных слоях за добавление оптимальных концентраций исследуемых ПАВ растет, и как следствие такая система способна эффективно передавать количество тепла. Определены числовые диапазоны поверхностного критерия для «ледяной» воды с добавлением различного вида ПАВ.

Ключевые слова: ламинарный пограничный слой, средняя толщина пограничного ламинарного слоя, поверхностное натяжение, поверхностно-активные вещества, скорость в ламинарном пограничном слое, оптимальные концентрации, поверхностный критерий.

Effect of surfactants on surface criteria in laminar boundary layer

Y.L. Bilonoha¹, O.R. Maksysko¹, I.G. Svidrak²
yuriy_bilonoha@ukr.net

¹Lviv national university of veterinary medicine and biotechnologies named after S. Gzhytskyj,
Pekarska Str., 50, Lviv, 79010, Ukraine;

²Lviv National Polytechnic University «Lviv Polytechnic»,
Stepan Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine;

It is shown that on the border the flow of the coolant – wall pipe, that is, within the laminar boundary layer (LBL), there is a powerful field of forces of surface tension. The intensity of surface forces characterized by superficial criteria P_0 . The value surface of the criterion Reynolds and Euler's criterion in LBL several orders of magnitude more from the Froude criterion and inverse of the Reynolds criterion, so the latter can be neglected. Experimentally found value of surface tension, cosine of the contact angle and dynamic viscosity of aqueous solutions influenced by surfactants. To aqueous solutions were added the most common anionic, nonionic and cationic surfactants. The optimal concentrations of anionic, nonionic and cationic surfactants in the «icy» water. It is established that at the optimal concentration of surfactant surface tension value is minimum. For these concentration surfactant were chosen and the value for dynamic coefficient of viscosity. We calculated average thickness of the laminar boundary layer when added to water, the optimal concentration of the studied surfactants. It is established that the reduction of surface tension minimizes the thickness of laminar boundary layers in the wall of the pipe–water. It is shown that the average speed in the near-wall layers for adding optimum concentrations of the studied surfactants. increases, and as a result this system is able to effectively transfer heat. Defined numerical ranges of the surface criterion for «ice» water with the addition of various surfactants. It is established that the value surface of the criterion of P_0 depend on the surface tension of the coolant. It was experimentally confirmed that when optimal concentrations of surfactant, there is a minimum value surface of the criterion of P_0 . From the graph based on superficial criteria from concentrations of surfactant, it is possible to determine the surface criterion and speed in LBL.

Key words: laminar boundary layer, average thickness of boundary laminar layer, surface tension, surfactants, speed in a laminar boundary layer, optimal concentrations, superficial criterion.

Вступ

Основною проблемою переробних галузей промисловості є низька їх енергоефективність. Не винятком є і підприємства харчової промисловості. Рідкофазні харчові продукти, молоко, соки, пиво, вершки та ін. повинні піддаватися тепловій обробці – пастеризації, охолодженню, оскільки швидко псуються, а тому і значні енерговитрати відбуваються саме на стадії теплової обробки продуктів. Всі ці процеси протікають у спеціальних теплообмінних апаратах, тобто на межі контакту двох фаз тверде тіло-рідина (стінка теплообмінника-теплоносії). На межі розділу двох фаз рідина – стінка трубопроводу виникає потужне поле сил поверхневого натягу, що змінює потік рідини з утворенням ламинарного приграничного шару (ЛПШ).

Існування ЛПШ шару розглядають з позиції гідромеханіки, тобто з врахуванням тангенціальних напружень від сили тертя в ЛПШ шарі (Кук, 1973). Нова наукова концепція розгляду гідромеханічних процесів, руху рідини в трубопроводах та апаратах з врахуванням дії сил поверхневого натягу на границі контакту тверде тіло-рідина була запропонована в роботі (Bilonoha, 2006). В роботі (Bilonoha, 2006) був розглянутий елементарний об'єм рідини в трубопроводі в межах ЛПШ та проаналізовано сили, що діють на цей

об'єм і враховуючи теорію подібності, були одержані такі критерії:

$$P_0 = \frac{1}{N} \frac{2\pi\sigma \cos\theta}{\mu v_x} \text{ – поверхневий критерій в ЛПШ} \quad (1)$$

$$N = \frac{v_x \delta \rho}{\mu} = 10,47 - 11,5 \quad (2)$$

де N – видозмінений критерій Рейнольдса, (Кук, 1973)

$$Eu = \frac{P}{\rho v_x^2} \text{ – критерій Ейлера в ЛПШ} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{g \delta}{v_x^2} \text{ – критерій Фруда в ЛПШ} \quad (4)$$

$$\frac{1}{Re} = \frac{\mu}{\delta \rho v_x} \text{ – обернений критерій Рейнольда в ЛПШ} \quad (5)$$

Також було встановлено їх числове значення. Поверхневий критерій для води за нормальних умов $P_0 = 376,81$, критерій Ейлера $Eu = 100$, критерій Фруда $Fr = 0,071$, обернений критерій Рейнольда $\frac{1}{Re} = 0,033$ (Bilonoha, 2006). Оскільки числові значення поверхневого критерію P_0 та критерію Ейлера Eu в ЛПШ на декілька порядків є більші від критерію Фруда та

оберненого критерію Рейнольдса, то останніми можна знехтувати.

Мета роботи: знайти діапазон поверхневого критерію для «льодяної» води за додавання оптимальних концентрацій різного виду ПАР.

Результати та їх обговорення

З рівності (1) видно, що значення поверхневого числа суттєво залежать від коефіцієнта поверхневого натягу, швидкості в пристінних шарах v_x та видозміненого критерію Рейнольдса N . Відомо, що коефіцієнт поверхневого натягу рідкофазних теплоносіїв можна зменшувати шляхом додавання до них малих концентрацій поверхнево-активних речовин (ПАР). Для ви-

значення діапазону значень поверхневого критерію проведена серія експериментів по забезпеченню зміни коефіцієнта поверхневого натягу σ , косинуса кута змочування $\cos\theta$ та динамічного коефіцієнта в'язкості μ водних розчинів під впливом ПАР. До водних розчинів додавались найбільш поширені аніонна, неіонна та катіонна ПАР. Коефіцієнт поверхневого натягу, динамічний коефіцієнт в'язкості та косинус кута змочування теплоносія визначали за загальновідомими методиками (Adamson, 1976).

На рис. 1 показані залежності коефіцієнта поверхневого натягу, динамічного коефіцієнта в'язкості води та косинуса кута змочування від концентрації аніонної, неіонної та катіонної ПАР.

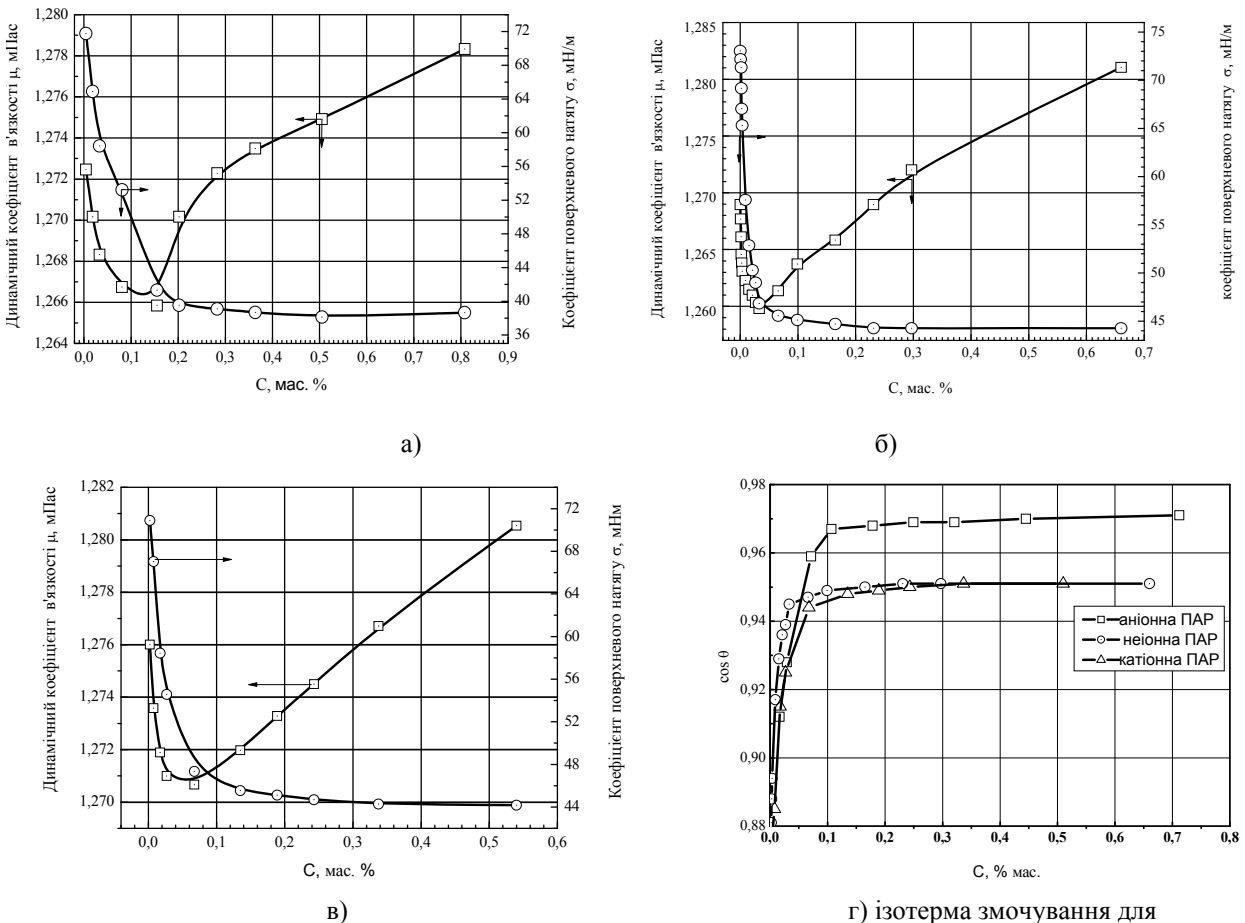


Рис. 1. Залежність коефіцієнта поверхневого натягу σ , динамічного коефіцієнта в'язкості μ та косинуса кута $\cos\theta$ змочування води від концентрації досліджуваних ПАР: а) аніонної; б) неіонної, в) катіонної ПАР, г) ізотерма змочування

Як видно з графіків, на кривій залежності коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації є мінімуми, які відповідають критичній концентрації міцелотворення (ККМ). Тобто за незначного зростання концентрацій ПАР коефіцієнт поверхневого натягу різко зменшується до ККМ, а за концентрацій вище ККМ спостерігається незначне його зменшення.

Для аніонної ПАР ККМ спостерігається за концентрації (0,10...0,15) мас.%. За цієї концентрації коефіцієнт поверхневого натягу води зменшується в 1,98

рази, для неіонної за концентрації (0,05...0,10) мас.% – в 1,66 рази, а для катіонної за концентрації (0,08...0,15) мас.% – в 1,57 рази в порівнянні з водою. Ці концентрації вважаються оптимальними. За цих концентрацій ПАР вибирали і значення для динамічного коефіцієнта в'язкості. Рідина з меншим значенням коефіцієнта поверхневого натягу краще змочує поверхню твердого тіла, при цьому кут змочування стає більш гострим. На рис. 1 (г) показано зале-

жність косинуса кута змочування води від концентрації ПАР.

Покажемо зміну поверхневого числа P_o в ЛПШ для водних розчинів за додавання оптимальних концентрацій досліджених ПАР. Швидкість в пристінних шарах знаходили з видозміненого числа Рейнольдса

$$v_x = \frac{N\mu}{\delta\rho},$$

приймаючи значення $N=10,5$, а середню товщину ЛПШ знаходили за формулою:

$$\delta = \frac{d^2 \sqrt{2\sigma \cos\theta \rho}}{Re\mu \lambda l K_T},$$

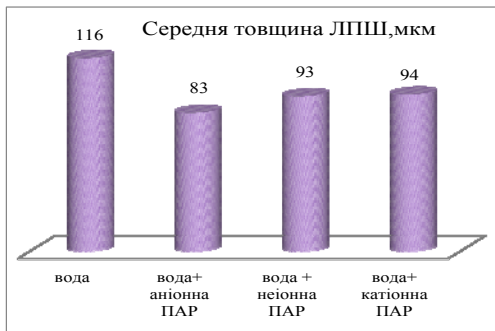
де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; $\cos\theta$ – гідрофільність поверхні стінки; ρ – густина рідини, кг/м³; d – діаметр живого перерізу потоку, м; λ – коефіцієнт Дарсі; $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$;

l – довжина трубопроводу, м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па с; K_T – коефіцієнт турбулізації Л шару, $K_T = \frac{Re_{роб}}{Re_{кр}}$; $Re_{кр} \approx 2320$. Число Рейнольдса $Re_{роб}$ знаходили за формулою $Re = \frac{vd\rho}{\mu}$.

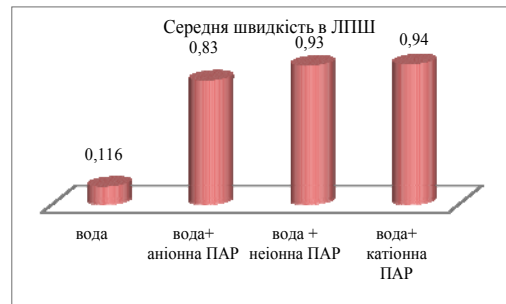
На підприємствах харчової, фармацевтичної та переробної промисловостей середня швидкість руху рідин в теплообмінній апаратурі становить $v \approx 1$ м/с, діаметр труб $d=21 \cdot 10^{-3}$ м, довжина труб $l=3$ м.

Значення середньої товщини ЛПШ для «льодяної» води (рис. 2а) та середню швидкість в ЛПШ (рис. 2б) за додавання оптимальних концентрацій досліджуваних ПАР показано на рис. 2.

Значення середньої товщини ЛПШ для «льодяної» води (рис. 2а) та середню швидкість в ЛПШ (рис. 2б) за додавання оптимальних концентрацій досліджуваних ПАР показано на рис. 2.



а)



б)

Рис.2. а) значення середньої товщини ЛПШ б) значення середньої швидкості в ЛПШ за додавання ПАР

Отже, середні товщини ЛПШ під дією ПАР зменшилися. За додавання аніонної ПАР в 1,4 рази; за додавання неіонної ПАР – у 1,25 рази, за додавання катіонної ПАР – у 1,23 рази. Додавання оптимальних концентрацій різних ПАР до води (теплоносія) можна суттєво зменшити коефіцієнт поверхневого натягу, мінімізувавши середню товщину ЛПШ в системі стінка трубопроводу – теплоносій. Середню швидкість ЛПШ під впливом вказаних ПАР розраховували за формулою (2). Значення середньої швидкості ЛПШ для різних видів ПАР представлено на рис. 2 б.

Зменшуючи середні товщини ЛПШ води, швидкість в них зростає, а це інтенсифікує проходження кількості теплоти через нього. Також енергія зв'язку між стінкою трубопроводу і приповерхневим шаром води зменшується, мінімізується «прилипання» рідини до стінок. Оскільки середня товщина ЛПШ суттєво залежить від коефіцієнта поверхневого натягу рідини, то і швидкість в приповерхневих шарах також залежить від нього.

Значення поверхневого числа розраховані згідно формули (1) представлені на рис. 3.

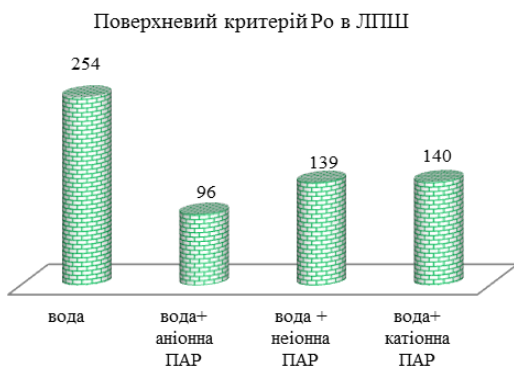


Рис. 3. Значення поверхневого критерію P_o в ЛПШ для різних ПАР

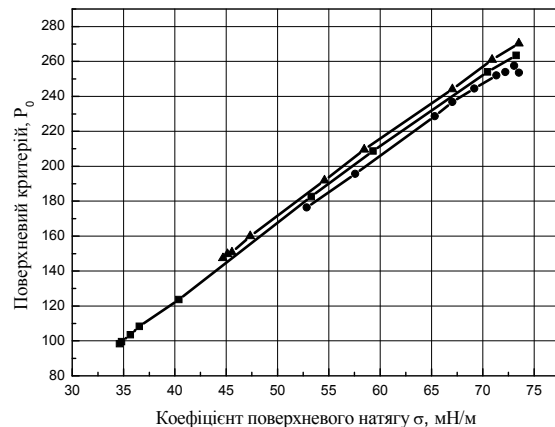


Рис. 4. Залежність поверхневого критерію від концентрацій ПАР

Поверхневий критерій є функцією від коефіцієнта поверхневого натягу теплоносія. При зменшенні коефіцієнта поверхневого натягу теплоносія значення поверхневого критерію P_0 також зменшуються. На рис. 4. показано залежність поверхневого критерію від концентрацій досліджуваних ПАР у воді.

Оскільки всі значення поверхневого критерію P_0 лежать на прямій і накладаються, то з такої залежності, вимірявши коефіцієнт поверхневого натягу σ після введення ПАР у теплоносій, можна визначити поверхневий критерій та швидкість у ЛПШ

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

Отже, за додавання оптимальних концентрацій ПАР до води, суттєво зменшується коефіцієнт поверхневого натягу, середня товщина ЛПШ є мінімальною, а середня швидкість в цьому шарі є максимальною, і значення поверхневого критерію – мінімальне, що дозволяє інтенсифікувати проходження кількості тепла за таких умов.

Висновки

1. Встановлено, що сили поверхневого натягу в межах ЛПШ характеризуються величиною поверхневого критерію P_0 .

2. Для характеристики теплоносія та можливості інтенсифікації теплопередачі запропоновано новий безрозмірний комплекс – поверхневий критерій P_0 , що є функцією від коефіцієнта поверхневого натягу теплоносія.

3. Встановлено діапазон поверхневого критерію для водних розчинів ПАР (96–140).

Бібліографічні посилання

- Kuk, G.A. (1973). *Processy i apparaty molochnoj promyshlennosti*. M. : Pishhevaja promyshlennost' (in Russian).
- Bilonoha, Yu.L. (2006). *Intensyfikatsiia ta optymizatsiia teplomasoobminnykh protsesiv pry vyrobnytstvi orhanopreparativ i pererobtsi vtorynnoi syrovyny miasokombinativ: avtoreferat dys...doktora tekhn. nauk: 05.18.12*. Odesa, 36 (in Ukrainian).
- Bilonoha, Yu.L. (2006). *Pro dotsilnist rozghliadu hidromekhanichnykh protsesiv z vrakhuvanniam syl poverkhnevoho natiahu na hranytsi kontaktu tverde tilo-ridyna. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2, 64 (in Ukrainian).
- Adamson, A. (1976). *Fizicheskaja himija poverhnostej: per. s ang*. M.: Mir (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 1.03.2017