

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ОБ'ЄМІ ДВОФАЗНОЇ РІДИНИ ЗА УМОВ ВИМУШЕНОЇ ЇЇ КОНВЕКЦІЇ

¹Вінницький національний технічний університет

Відома доцільність використання методів регулярного теплового режиму за умов нестационарних теплових процесів в системі «навколишнє середовище — тверде тіло (набір твердих тіл)» для визначення теплофізичних параметрів твердих тіл та інтенсивності тепловіддачі.

Метою дослідження є встановлення можливості існування регулярного теплового режиму під час охолодження чи нагрівання двофазної рідини (фугату) в тонкостінній циліндричній посудині за вимушеної її конвекції.

Досліджено теплообмін в умовах як охолодження, так і нагрівання двофазних рідин за вимушеної конвекції стосовно можливості реалізації регулярного теплового режиму.

Експериментально встановлено, що на проміжку часу, в якому досліджено охолодження (нагрівання) фугату за умов його вимушеної конвекції у внутрішній тонкостінній посудині, має місце лінійна залежність, яка характерна для регулярного теплового режиму в твердому тілі.

Отримані експериментальні дані встановлюють доцільність застосування теорії регулярного теплового режиму для визначення інтенсивності теплообміну до двофазних рідин під час охолодження (нагрівання) в умовах вимушеної конвекції. Подані результати розрахунку темпу охолодження (нагрівання), коефіцієнтів тепловіддачі. Встановлено існування регулярного теплового режиму в двофазній рідині.

Експериментальні і теоретичні дослідження проводяться для подальшого розвитку експериментально-розрахункового методу, потрібного для вивчення теплообміну середовищ з невідомою або частково відомою інформацією про теплофізичні властивості і реологічне поведіння.

Результати розв'язання задач теплообміну в обмеженому об'ємі двофазної рідини можуть бути використані для виконання реальних технологічних завдань утилізації відходів харчової промисловості.

Ключові слова: двофазна рідина, регулярний тепловий режим, нестационарний теплообмін, темп охолодження (нагрівання), коефіцієнт тепловіддачі.

Вступ

Значна кількість галузей промисловості застосовує етиловий спирт. Економічність виробництва етилового спирту суттєво залежить від енергоефективності використовуваного устаткування, витратами різних видів енергії, застосуванням заходів з енергозбереження протягомусього процесу, а також розробкою енерготехнологій. Утилізація спиртової барди, крім важливого економічного ефекту, має також велике екологічне значення [1].

Рідка фаза барди (мікрофільтрат) — це розчин органічних речовин світло-коричневого кольору. Вона складається з: пептидів, амінокислот, неутілізованого цукру, органічних кислот і води. Загальний вміст органічних речовин оцінюватися за стандартними показниками — хімічним споживанням кисню і біологічним споживанням кисню [2], [3].

Свіжа зернова барда — це водна суспензія з невеликою кількістю розчинених і завислих сухих речовин: в ній міститься 6...8 % сухих речовин, з яких 3...4 % складають розчинені речовини, а решта — нерозчинна завись. Зазвичай застосовується технологія упарювання барди на випарних станціях. Однак вартість випарних станцій і відповідно всього обладнання для утилізації, досить висока. Процес випарування потребує значних енергетичних витрат, а також не повністю вирішує екологічні проблеми [4].

Все частіше барду використовують для виробництва біогазу, основанийому на анаеробному бродинні, коли барда подається у спеціальні ємності разом з анаеробними бактеріями, які переробля-

ють поживні речовини барди на біогаз. Біогаз може спалюватися в котельнях, а утворений осад — як добриво в агропромисловості. Перевагою цього методу переробки є відносно низькі експлуатаційні витрати, недоліком — необхідність використання метантенків великих об'ємів, що потребує значних земельних ділянок, позаяк процес переробки барди анаеробними бактеріями дуже повільний. Ще одним недоліком методу є тривалий період виходу на режим — до 6 місяців. Тому схеми з виробництва біогазу в метантенках не знайшли широкого застосування [4].

Метою роботи є встановлення можливості існування регулярного теплового режиму під час охолодження (нагрівання) фугату в тонкостінній циліндричній посудині за умов вимушеної його конвекції.

Результати дослідження

В роботі пропонується встановити можливість існування регулярного теплового режиму в двофазній рідині, яка розміщена в тонкому циліндричному об'ємі. Рідину розміщено у металевій циліндричній тонкостінній оболонці з термічним опором $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$. Величинами, що потрібно встановити, є темп охолодження (нагрівання) m , коефіцієнти тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) і тонкою металевою циліндричною стінкою α_1 .

Дослідження нестационарного теплообміну в умовах вимушеної конвекції проведено на експериментальній установці, схему якої показано на рис. 1. На цій схемі використано такі позначення:

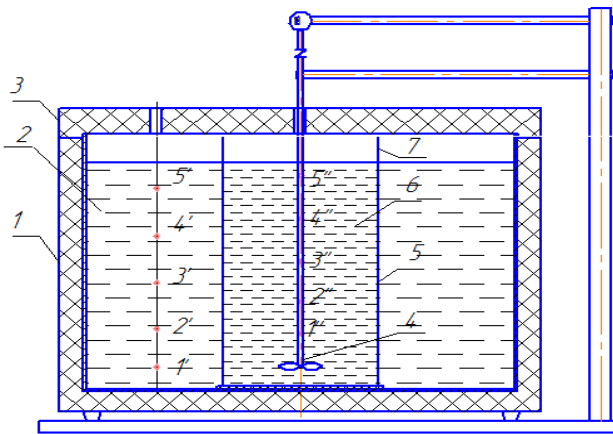


Рис. 1. Схема експериментальної установки

1 — ізолювана зовнішня посудина, 2 — навколишнє середовище (вода), 3 — ізолювана металева кришка, 4 — пропелерний змішувач, 5 — внутрішня тонкостінна посудина, 6 — дослідна рідина (фугат), 7 — запобіжник перетоків газу над поверхнею води і поверхнею дослідної рідини.

Експеримент проведено за умов вимушеної конвекції в об'ємі, який має форму тонкостінного циліндра для дослідної рідини — фугату, обмежений навколишнім середовищем (водою). Як дослідна рідина в експерименті використовується фугат під час його охолодження (нагрівання). Лабораторний експериментальний стенд розроблено на кафедрі теплоенергетики ВНТУ (див. рис. 1) [5].

Частота обертання n вала змішувача змінюється в межах 32...120 об/хв; діаметр пропелера — 0,08 м.

На рис. 2 показано характеристику зміни середньооб'ємної надлишкової температури $\ln \vartheta = f(\tau)$ для фугату.

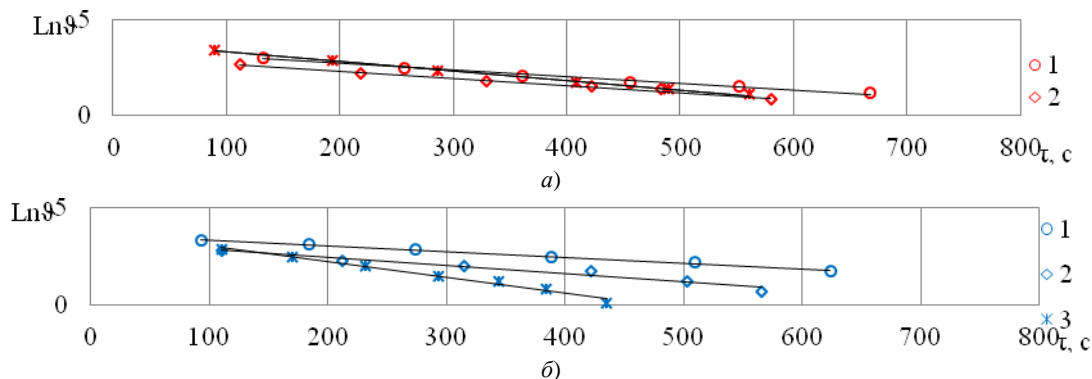


Рис. 2. Зміна надлишкової температури за часом: а — під час нагрівання; б — під час охолодження (2) фугату за таких обертів пропелерної мішалки: 1 — $n = 32$ об/хв; 2 — $n = 62$ об/хв; 3 — $n = 120$ об/хв

В табл. 1, 2 подані експериментальні дані для фугату в умовах його охолодження і нагрівання. Крива представляє апроксимацію дослідних даних надлишкової температури у вигляді функції

$$\ln \vartheta = m \cdot \tau + C, \quad (1)$$

де $\vartheta = \left| \bar{T}_1 - \bar{T}_2 \right|$ — надлишкова середньооб'ємна температура фугату \bar{T}_2 в циліндричній посудині зі сторони навколишнього середовища, \bar{T}_1 °C; m — темп охолодження (нагрівання), C — стала рівняння. В табл. 1, 2 подані дані темпу охолодження (нагрівання) фугату та густої маси фугату.

Таблиця 1

Темп охолодження (нагрівання) фугату

№ з/п	Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Темп охолодження (нагрівання) m , с ⁻¹	Стала рівняння C	Коефіцієнт детермінації R^2
1	32	Нагрівання	0,0036	3,5616	0,9722...0,9929
2	120		0,0051	3,882	
3	32	Охолодження	0,0031	3,6837	0,9744...0,9932
4	120		0,0077	3,6908	

Таблиця 2

Темп охолодження (нагрівання) густої маси фугату

№п/п	Кількість обертів мішалки n , об/хв	Процес	Темп охолодження (нагрівання) m , с ⁻¹	Стала рівняння C	Коефіцієнт детермінації R^2
1	40	Нагрівання	0,0031	3,1246	0,984...0,0037
2	54		0,0046	3,3139	
3	40	Охолодження	0,0011	3,0233	0,9823...0,992
4	54		0,003	3,0874	

Залежність $\text{Ln } \vartheta = -m \cdot \tau + C$ отримана аналітично і в результаті експерименту.

Тоді температурне поле буде описуватися

$$\vartheta = A_1 \cdot U_1 \cdot e^{-m\tau}. \quad (2)$$

Це відношення показує, що зміна надлишкової температури як у просторі, так і у часі залежить від початкового розподілу температури. Логарифмуючи останнє рівняння та опускаючи індекси, отримуємо:

$$\text{Ln } \vartheta = \text{Ln}(AU) - m \cdot \tau \quad (3)$$

або

$$\text{Ln } \vartheta = -m \cdot \tau + C(x, y, z). \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що натуральний логарифм надлишкової температури всіх точок тіла змінюється у часі за лінійним законом [6], [7].

Після диференціювання обох частин рівняння (4) у часі отримаємо:

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{d\vartheta}{d\tau} = -m = \text{const}. \quad (5)$$

Якщо експериментально визначити зміну надлишкової температури ϑ в часі τ і побудувати залежність в напівлогарифмічних координатах, то очевидно, що темп охолодження в стадії регулярного режиму знаходиться [1] так:

$$\frac{\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} = m = \text{const}. \quad (6)$$

Залежність (6) отримана аналітично і експериментально для твердих тіл [1], [2].

Видно, що $(\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2)$ безрозмірна величина

$$\text{Ln}\vartheta_1 - \text{Ln}\vartheta_2 = \text{Ln} \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}. \quad (7)$$

Характеризуючи дані в табл.1, 2 для фугату під час його охолодження і нагрівання, середня стала рівняння C знаходиться в межах 3,6873...3,7218, для густої маси фугату — в межах 3,055...3,2193.

Встановлено, що на проміжку часу, в якому досліджується охолодження (нагрівання) фугату у внутрішній тонкостінній посудині за умов вимушеної конвекції, витримується лінійна залежність $\text{Ln}(\vartheta) = f(\tau)$, яка характерна для регулярного теплового режиму в твердому тілі [6].

Розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) і внутрішньою тонкостінною посудиною визначається за критеріальним рівнянням відповідно до режиму тепло-

обміну в кільцевому каналі [7], [8]

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{\overline{Nu}_1 \cdot \lambda_1}{H}, \quad (8)$$

де \overline{Nu}_1 — критерій Нуссельта; λ_1 — коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища (води), Вт/(м·К); H — визначальний розмір (висота внутрішньої посудини).

Коефіцієнти тепловіддачі знаходяться локально в часі $\bar{\alpha}_1$.

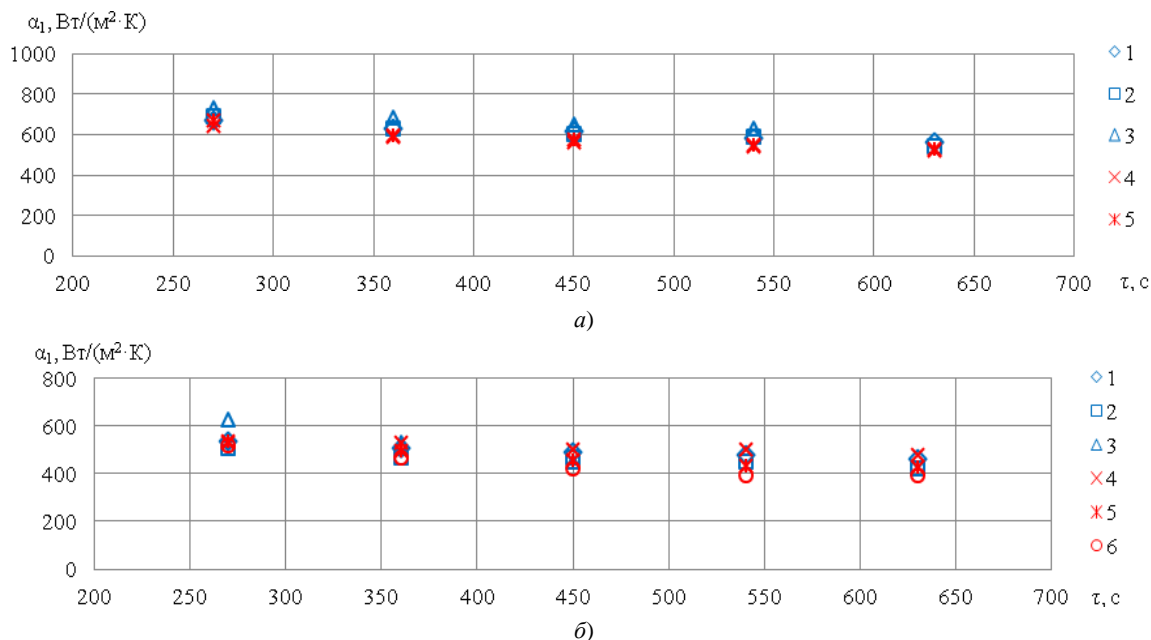


Рис. 3. Коефіцієнт тепловіддачі в часі: *a* — під час нагрівання; *б* — під час охолодження фугату за таких обертів пропелерної мішалки: 1 — $n = 32$ об/хв; 2 — $n = 62$ об/хв; 3 — $n = 120$ об/хв; густої маси фугату 4 — $n = 40$ об/хв; 5 — $n = 54$ об/хв; 6 — $n = 104$ об/хв

З рис. 3 випливає, що: α — коефіцієнт тепловіддачі між навколишнім середовищем (водою) і тонкою металевою циліндричною стінкою під час нагрівання фугату і густої маси фугату знаходиться в межах $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а під час охолодження — $450 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Виявлені ознаки підтверджують існування регулярного теплового режиму в дослідженні фугату в металевій тонкостінній оболонці під час його охолодження (нагрівання) в умовах вимушеної конвекції.

В роботі проводиться порівняння експериментального коефіцієнта теплопередачі для води і фугату під час їхнього охолодження (нагрівання) в умовах вимушеної конвекції.

Експериментальний коефіцієнт теплопередачі в системі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$K = \frac{q}{\Delta t}, \quad (9)$$

де $\Delta t = t_1 - t_2$ — середній температурний напір між навколишнім середовищем і середньооб'ємною температурою дослідної рідини.

В роботі вимірювався тепловий потік, який проходить по осі циліндра (вздовж аплікати z).

Теплота, що сприймається дослідною рідиною, кДж

$$Q' = M' \cdot C_p' \cdot \Delta t'_{\text{сер}}, \quad (10)$$

де M' , C_p' — маса та питома теплоємність навколишнього середовища (води), відповідно.

Питомий тепловий потік, $\text{кВт}/\text{м}^2$

$$q = \frac{Q'}{F_{\text{то}} \cdot \Delta t}. \quad (11)$$

де $F_{\text{то}}$ — площа теплообмінної поверхні, м^2 ; Δt — проміжок часу, який досліджується, с.

Різниця температур, осереднених по висоті теплообмінної поверхні у внутрішній посудині

$$\Delta t'_{\text{сеп}} = t'_{\text{сеп}1} - t'_{\text{сеп}2}, \quad (12)$$

де $t'_{\text{сеп}1}, t'_{\text{сеп}2}$ — осереднена по висоті теплообмінної поверхні температура у внутрішній порожнині в початковий і кінцевий момент часу експерименту, відповідно.

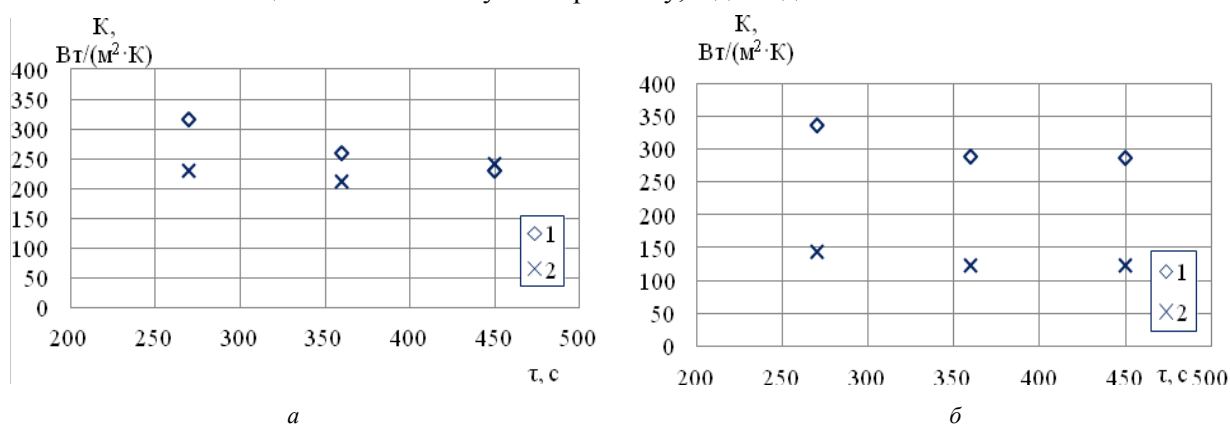


Рис. 4. Коефіцієнт теплопередачі в часі в умовах: *a* — нагрівання; *б* — охолодження, коли оберти пропелерної мішалки $n = 32$ об/хв: 1 — вода–вода; 2 — вода–фугат

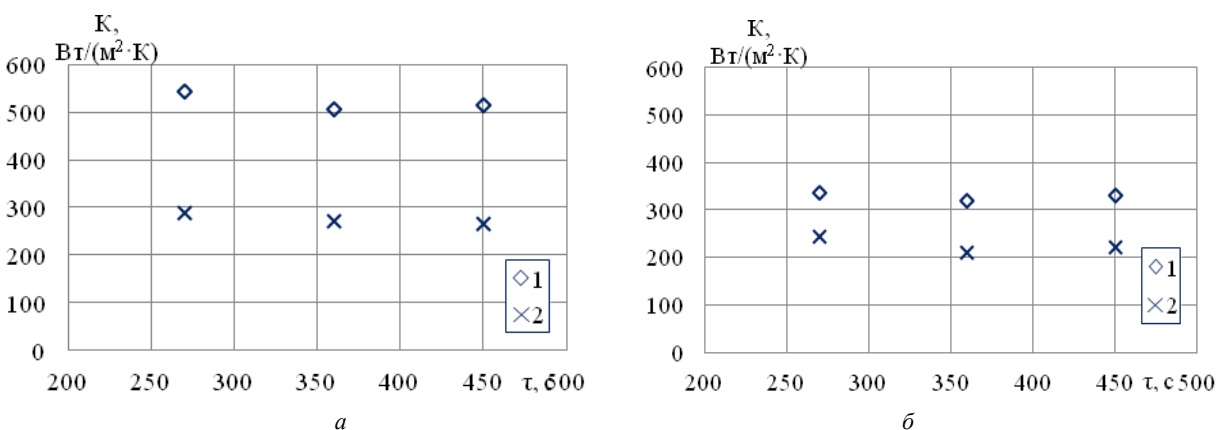


Рис. 5. Коефіцієнт теплопередачі в часі за умов: *a* — нагрівання; *б* — охолодження, коли оберти пропелерної мішалки $n = 62$ об/хв: 1 — вода–вода; 2 — вода–фугат

Згідно з [9] «після проведення механічної сепарації на тверду і рідку складову розчинені залишки крохмалю, цукру і дріжджів залишаються в рідкій фракції — фугаті. Вони складають до 30 % від загального обсягу твердих речовин в барді. В основному це тверді частинки розміром менше 0,2 мм і розчинені речовини». На погляд автора вищевикладене пояснює зниження інтенсивності тепловіддачі в системі «вода—фугат», у порівнянні із системою «вода—вода».

Висновки

1. Досліджено інтенсивність теплообміну між навколишнім середовищем і внутрішньою тонкостінною посудиною за умов охолодження (нагрівання) фугату в процесі нестационарного теплообміну.
2. Експериментально встановлено, що на проміжку часу, в якому досліджується охолодження (нагрівання) фугату за умов його вимушеної конвекції у внутрішній тонкостінній посудині, має місце лінійна залежність $\ln(\theta) = f(\tau)$, яка характерна для регулярного теплового режиму в твердому тілі.
3. Розбіжність між коефіцієнтами теплопередачі через тонку металеву стінку внутрішньої посудини в спряжених задачах «вода—вода» і «вода—фугат» пояснюється наявністю крохмалю, цукру і дріжджів у фугаті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. І. Бухкало, О. І. Ольховська, В. О. Ольховська, і М. М. Зіпунніков, «Дослідження та аналіз інноваційних заходів з технології комплексної утилізації післяспиртової барди», *Вісник Національного Технічного Університету «ХПИ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*, № 15, с. 66-74, 2019.
- [2] П. Породько, О. Осипенко, В. Таран, і В. Породько, «Ефективне використання відходу спиртового виробництва», *Харчова і переробна промисловість*, № 1, с. 26-31, 2004.

- [3] M. Yatskov, N. Korchyk, and O. Prorok, "Development of technology for recycling the liquid iron-containing wastes of steel surface etching," *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, № 2/6 (86), с. 70-78, 2017.
- [4] Н. М. Корчик, Н. М. Буденкова, і С. В. Кирилук, «Розробка технологій переробки рідких відходів спиртового виробництва.» *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VII (25), issue: 206, pp. 38-41, 2019.
- [5] С. Й. Ткаченко, і Н. В. Пішеніна, *Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2017.
- [6] Г. М. Кондратьев, *Регулярный тепловой режим*. Москва, Россия, 1954, 408 с.
- [7] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, и А. С. Сукомел, *Теплопередача*, учеб. для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. Москва, Россия, 1975, 488 с.
- [8] М. А. Михеев, и И. М. Михеева. *Основы теплопередачи*, изд. 2-е, стереотип. Москва: Энергия, 1977, 344 с.
- [9] *Переработка спиртовой барды*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ecostar.by/index.php?option=com_content&view=article&id=64:spirtova-ya-barda&catid=23&Itemid=45 .

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.10.2021

Власенко Ольга Володимирівна — аспірантка кафедри теплоенергетики, e-mail: olgakysak7@gmail.com .
Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Vlasenko¹

Investigation of Heat Exchange in the Volume of Two-Phase Liquid under the Conditions of its Forced Convection

¹Vinnitsia National Technical University

The expediency of using the methods of regular thermal regime under non-stationary thermal processes in the system "environment — solid (set of solids)" to determine the thermophysical parameters of solids and heat transfer intensity is known.

The purpose of this study is to establish the possibility of the existence of a regular thermal regime during cooling (heating) of a two-phase liquid — supernatant in a thin-walled cylindrical vessel with forced convection.

The heat exchange in the conditions of cooling (heating) of two-phase liquids at the forced convection for a possibility of realization of a regular thermal mode is investigated.

It was determined that for the period of time under study, the ratio for excess temperature, which is characteristic of the regular thermal regime in solids, is maintained.

The obtained experimental data establish the expediency of applying the theory of regular heat regime to determine the intensity of heat exchange to two-phase liquids during cooling (heating) under conditions of forced convection. The results of calculation of cooling rate (heating), heat transfer coefficients are presented. The existence of a regular thermal regime in a two-phase liquid has been established.

Experimental and theoretical studies are conducted for the further development of the experimental calculation method, which is required in the study of heat transfer of media with unknown or partially known information on thermophysical properties and rheological behavior. The results of solving heat exchange problems in a limited volume are planned to be used in solving real technological problems.

Keywords: two-phase liquid, regular heat regime, non-stationary heat exchange, cooling rate (heating), heat transfer coefficient.

Vlasenko Olha V. — Post-Graduate Student of the Chair of Heat Power Engineering, e-mail: olgakysak7@gmail.com

Исследование теплообмена в объеме двухфазной жидкости в условиях вынужденной ее конвекции

¹Винницький національний технічний університет

Известна целесообразность использования методов регулярного теплового режима в условиях нестационарных тепловых процессов в системе «окружающая среда—твердое тело (набор твердых тел)» для определения теплофизических параметров твердых тел и интенсивности теплоотдачи.

Целью исследования является установление возможности существования регулярного теплового режима во время охлаждения (нагревания) двухфазной жидкости — фугата в тонкостенном цилиндрическом сосуде при вынужденной ее конвекции.

Исследован теплообмен в условиях как охлаждения, так и нагревания двухфазных жидкостей с вынужденной конвекцией относительно возможности реализации регулярного теплового режима.

Экспериментально установлено, что на промежутке времени, в котором исследовано охлаждение (нагревание) фугата при его вынужденной конвекции во внутреннем тонкостенном сосуде, имеет место линейная зависимость, которая характерна для регулярного теплового режима в твердом теле.

Полученные экспериментальные данные устанавливают целесообразность применения теории регулярного теплового режима для определения интенсивности теплообмена в двухфазных жидкостях во время охлаждения (нагревания) в условиях вынужденной конвекции. Представлены результаты расчета темпа охлаждения (нагревания), коэффициентов теплоотдачи. Установлено существование регулярного теплового режима в двухфазной жидкости.

Экспериментальные и теоретические исследования проводятся для дальнейшего развития экспериментально-расчетного метода, необходимого для изучения теплообмена сред с неизвестной или частично известной информацией о теплофизических свойствах и реологического поведения.

Результаты решения задач теплообмена в ограниченном объеме двухфазной жидкости могут быть использованы для выполнения реальных технологических задач утилизации отходов пищевой промышленности

Ключевые слова: двухфазная жидкость, регулярный тепловой режим, нестационарный теплообмен, темп охлаждения (нагревания), коэффициент теплоотдачи.

Власенко Ольга Владимировна — аспирант кафедры теплоэнергетики, e-mail: olgakytsak7@gmail.com