



УДК 536.24

НЕСТАЦІОНАРНИЙ ТЕПЛООБМІН У СИСТЕМІ «ВОДА-СТІНКА-В'ЯЗКА РІДИНА»

Денесяк Дмитро Іванович*, аспірант
Вінницький національний аграрний університет

D. Denesiak*, Postgraduate Student
Vinnytsia National Agrarian University

Експериментально досліджена нестационарна теплопередача від нагрітої води через тонку циліндричну металеву стінку до цукрового розчину, який знаходиться у циліндричній посудині обмеженого об'єму. Встановлена розбіжність до 40 – 45% експериментальних значень коефіцієнтів теплопередачі від води до розчину та тепловіддачі від циліндричної стінки до розчину і їх значень розрахованих з застосуванням критеріальних залежностей для умов стаціонарного теплообміну у великому об'ємі.

Явно виражених ефектів «спряженої задачі теплообміну» в дослідженому діапазоні параметрів не виявлено.

Ключові слова: нестационарний теплообмін; коефіцієнт тепловіддачі; коефіцієнт теплопередачі; експериментально-розрахунковий метод; великий об'єм; обмежений об'єм, спряжена задача теплообміну.

Ф. 8. Рис. 4. Літ. 7.

1. Вступ. Постановка задачі

Експериментальні дослідження конвективного теплообміну зазвичай зводиться до визначення коефіцієнту тепловіддачі α . Під час досліджень вимірюють тепловий потік q , температуру стінки t_c та дослідної рідини t_p , за якими визначають α . При цьому q та t_c визначити можливо доступними засобами, а температура рідини вибирається дослідником із міркувань раціонального опису процесу теплопередачі [1, 2]. Вибір останньої визначальної температури вносить значну розбіжність у числове значення шуканого коефіцієнту α .

Коефіцієнт тепловіддачі це складна функція, яка залежить від ряду факторів, таких як теплофізичні властивості досліджуваного середовища, геометричні розміри, температури тіла та потоку рідини та ін. Для аналітичного опису функції α використовують теорію подібності та отримані на її основі безрозмірні комплекси, які для умов вільної конвекції мають вигляд $Nu = C \cdot Ra^n$. Де Nu – число Нуссельта, $Nu = \alpha \cdot L^* / \lambda$, в якому L^* та λ – визначальний розмір та коефіцієнт теплопровідності середовища відповідно. C та n – коефіцієнти критеріального рівняння, визначаються із експерименту, Ra – число Ралея, яке рівне добутку $Ra = Gr \cdot Pr$, число Грасгофа – $Gr = (g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot L^3) / \nu^2$, числоПрандтля – $Pr = \nu / a$ [1-3]. В даних залежностях g – прискорення вільного падіння, m^2/c ; β – коефіцієнт температурного розширення, $1/^\circ C$; ν – кінематична в'язкість, m^2/c ; a – коефіцієнт теплопровідності, m^2/c ; $\Delta t = t_c - t_p$ – різниця температур стінки та рідини, $^\circ C$.

Для обґрунтування доцільності застосування того чи іншого критеріального рівняння, необхідно визначити умови протікання досліджуваного теплообмінного процесу. До цих умов відносяться теплові та температурні режими процесу, геометричні умови, граничні умови, форма об'єму у якому відбувається теплообмін (великий об'єм, обмежений простір).

«Великим об'ємом» за умов вільної конвекції вважають такий об'єм рідини, що рух, який виникає біля інших тіл у цьому об'ємі не впливає на течію біля теплообмінної поверхні. Визначальною температурою t_{∞} для розрахунку критеріїв подібності є температура рідини за межами рухомого шару t_{∞} . За цих умов середній коефіцієнт тепловіддачі біля вертикальної стінки у «великому об'ємі» визначається за такими залежностями [4]:

$$\text{ламінарна течія при } t_{cr} = \text{const} \quad \overline{Nu} = 0,63 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (1)$$

$$\text{при } q_{cr} = \text{const} \quad \overline{Nu} = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot (Pr_p / Pr_{cm})^{0,25}, \quad (2)$$

$$\text{турбулентний рух} \quad \overline{Nu} = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot (Pr_p / Pr_{cm})^{0,25}. \quad (3)$$

*Науковий керівник: Ткаченко Станіслав Йосипович, д.т.н., професор
S. Tkachenko, Doctor of Technical Sciences, Full Professor



Авторами [4] для умов вільної конвекції представлена залежність (4). Умови використання даної залежності наступні, при $6,2 \cdot 10^6 < Gr_h \cdot Pr < 1,1 \cdot 10^9$, $3,2 < Pr < 1,7 \cdot 10^3$, визначальна температура це різниця між температурами рідини і стінки ємності $\Delta t = t_p - t_{ct}$. За характерний розмір приймалась висота внутрішньої посудини – l .

$$\overline{Nu}_2 = 1,3 \cdot Ra_2^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ct}} \right)_2^{0,25} \quad (4)$$

В «обмеженому об'ємі» в умовах вільної конвекції товщина пограничного шару біля обмежувальних поверхонь стає співрозмірною з геометричними розмірами самого простору. В такому випадку процеси нагрівання й охолодження неможливо розглядати незалежно. Якщо у «великому об'ємі» інтенсивність тепловіддачі майже не залежить від форми теплообмінної поверхні, то в «обмеженому об'ємі» формування швидкісного і температурного полів у рідині відбувається під сильним впливом форми стінок [4].

Для обмежено простору існує значна кількість напрацювань по опису процесу та виведені критеріальні залежності, але вони носять досить вузьку направленість і мають обмеження, наприклад, по діапазону чисел ($Gr \cdot Pr$) та геометричним розмірам, які виключають їх масове використання. Детальний аналіз залежностей для «обмеженого об'єму» наведено у даній роботі [4].

Метою даного дослідження є визначення можливості застосування для оцінки коефіцієнта теплопередачі за умов нестационарного теплообміну в обмеженому об'ємі критеріальних залежностей для визначення коефіцієнтів тепловіддачі за умов стаціонарного теплообміну.

2. Основні результати

Для досягнення мети проведені експерименти за умов природної конвекції в об'ємі, який має форму тонкостінного циліндра (товщина стінки 0,5 мм) для дослідної рідини та зовнішнього коаксіального каналу для грійного середовища, геометричні розміри поверхонь теплообміну: зовнішня кільцева порожнина діаметром 200 мм / 97 мм, висота – 12 см; внутрішня циліндрична порожнина діаметром 96 мм; висота – 90 мм. Лабораторний експериментальний стенду розроблений та апробований на кафедрі теплоенергетики ВНТУ (рис. 1) [4, 7].

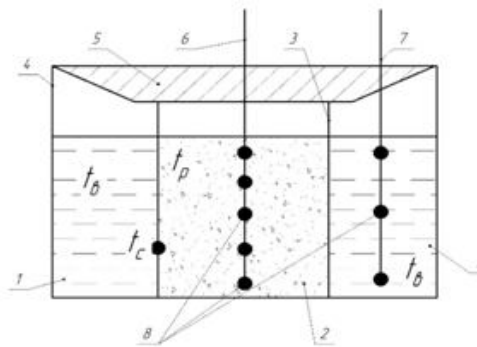


Рис. 1. Схема дослідної установки

У якості дослідної рідини в експерименті використовувався цукровий розчин 3-х масових концентрацій: 50%, 60% та 70% твердої частини. Теплофізичні властивості розчинів прийнято згідно [5, 6]. Маса грійного середовища $\approx 2,3$ кг, дослідної речовини – 0,6-0,8 кг; зміна температур грійного середовища 78-42 °С, нагріваного – 20-65 °С. Температура навколишнього середовища за межами системи 22-30 °С.

На рисунку 2 представлений характер зміни температури теплоносіїв за час експерименту.

Рисунок 2 показує, що процес нестационарний, температурний напір змінюється на протязі всього експерименту. У даному випадку температуру стінки не можна вважати постійною, як по висоті так і в часі. Згідно [3] при значних інтенсивностях процесу теплообміну за умов застосування рівнянь Ньютона-Ріхмана та Фур'є можуть виникнути парадокси, такі як $\alpha < 0$. Для розглянутої системи тіл закон залежності температури стінки від координат не може бути заданий попередньо, а повинен бути отриманий шляхом спільного вирішення системи рівнянь розподілу теплоти в рідині і у твердому тілі та рівняння руху, при чому на границі тверде тіло – рідина теплові потоки рівні. Дане формулювання задачі теплообміну в класичній літературі має назву спряженої задачі теплообміну.

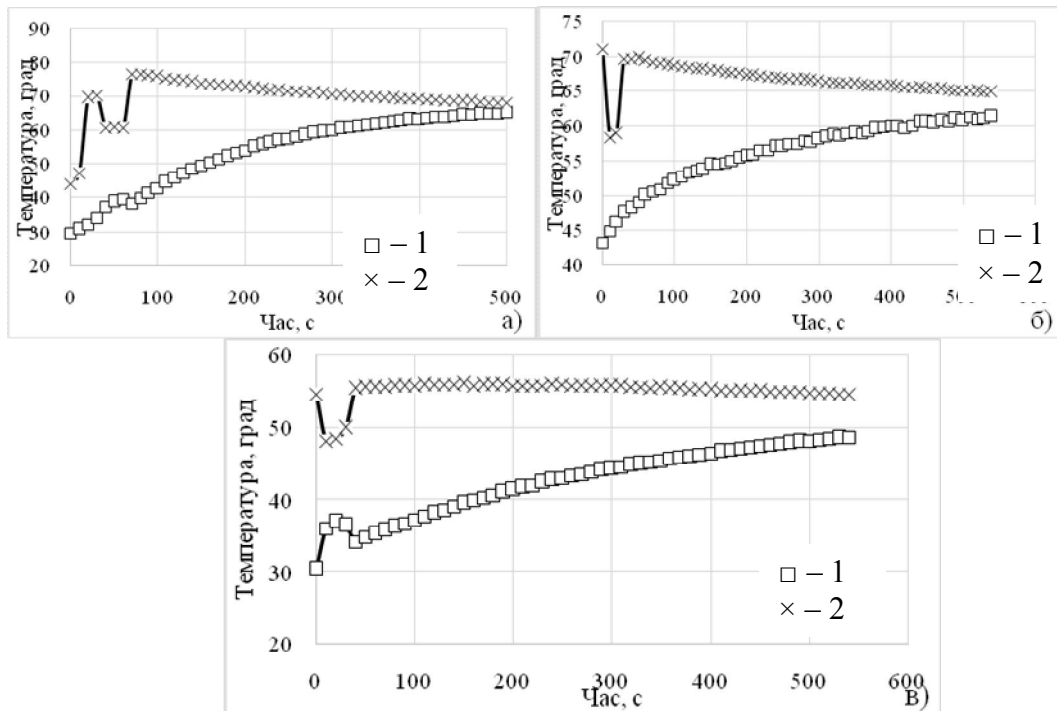


Рис. 2. Усереднені по висоті температури цукрового розчину (1) та води (2), за умов масових концентрацій розчину: а) 50%; б) 60%; в) 70%.

Згідно графіків (рис. 2) процес теплообміну в експериментальній установці протікає при змінному температурному напорі, змінній температурі дослідної рідини t_p та грійного середовища t_v . Швидкість зміни температур залежить від типу досліджуваної речовини, початкової різниці температур, відношення мас грійного та нагріваного середовища, умов теплообміну з навколишнім середовищем (температура навколишнього повітря, якості та тип ізоляційних конструкцій і т. п.), а також взаємним впливом t_p та t_v . Отже, можна визнати даний процес як нестационарний, а задача теплообміну, що розглядається – спряжена.

Наступним фактором, який впливає на вибір критеріального рівняння є вибір умов теплообміну: «великий об'єм» та «обмежений простір». Із геометричних розмірів тип умов теплообміну визначити неможливо, а неправильна постановка завдання дослідження та вибір методів аналізу може призвести до невірної результату. Відповідно до цього, виникає необхідність в уточненні умов теплообміну який здійснюється в установці.

Тип умов визначаємо: якщо величина δ/R не значно відхиляється від 1, вважаємо що процес перетікає у невизначених умовах: великий об'єм – обмежений об'єм, δ та R – відповідно товщина граничного теплового шару та радіус ємності з дослідною рідиною. Граничний тепловий шар визначено згідно [2].

$$\delta = 4,23 \cdot \sqrt[4]{\frac{v \cdot \lambda \cdot l}{c_p \cdot \rho \cdot g \cdot (t_{ст} - t_p)}}, \quad (5)$$

Для концентрації цукрового розчину 50 % спостерігається відношення δ/R у межах 0,44 до 0,61; для 60% – 0,55-0,87; для 70% – 1,03 до 1,08. Тобто, процес протікає на межі великий об'єм – обмежений об'єм.

Задача теплообміну у об'ємі на межі великий об'єм-обмежений об'єм та за умов нестационарного процесу коли можуть проявитись ефекти спряженої задачі, в доступній нам літературі не висвітлювалась, нам невідома методики яка б якісно описувала даний процес.

В дослідній установці (рис. 1) передача теплоти відбувається від грійного теплоносія – води в зовнішній порожнині до досліджуваного середовища – цукрового розчину через циліндричну поверхню з малим термічним опором $1,1 \cdot 10^{-4}$ (м²·К)/Вт. З цих міркувань термічний опір стінки не враховуємо. Тоді розрахунковий коефіцієнт теплопередачі розраховується за залежністю (6).

$$k_{Nu} = \frac{\alpha_{1Nu} \cdot \alpha_{2Nu}}{\alpha_{1Nu} + \alpha_{2Nu}}, \quad (6)$$

де α_{1Nu} , α_{2Nu} – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від грійного середовища до стінки та від стінки до дослідної рідини. Для їх визначення використаємо критеріальні залежності (2) та (4).



Експериментальний коефіцієнт теплопередачі розраховували як відношення отриманого в експерименті теплового потоку $q_{\text{екс}}$ до експериментального температурного напору $\Delta t_{\text{екс}} = t_p - t_{\text{ст}}$ за залежністю

$$k_{\text{екс}} = q_{\text{екс}} / \Delta t_{\text{екс}} [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]. \quad (7)$$

Під час проведення експерименту, у нашому випадку, немає можливості провести заміри температури стінки, а отже і достатньо точно визначити α . Тому температурою стінки задаємо та уточнюємо її методом послідовного наближення. Експериментальний коефіцієнт тепловіддачі для цукрового розчину $\alpha_{2\text{екс}}$ знаходимо із співвідношення

$$\alpha_{2\text{екс}} = \left(\frac{1}{k_{\text{експ}}} - \frac{1}{\alpha_{1\text{Nu}}} \right)^{-1}, \quad (8)$$

На рис. 3 представлено співставлення експериментальних та розрахункових коефіцієнтів тепловіддачі α_2 .

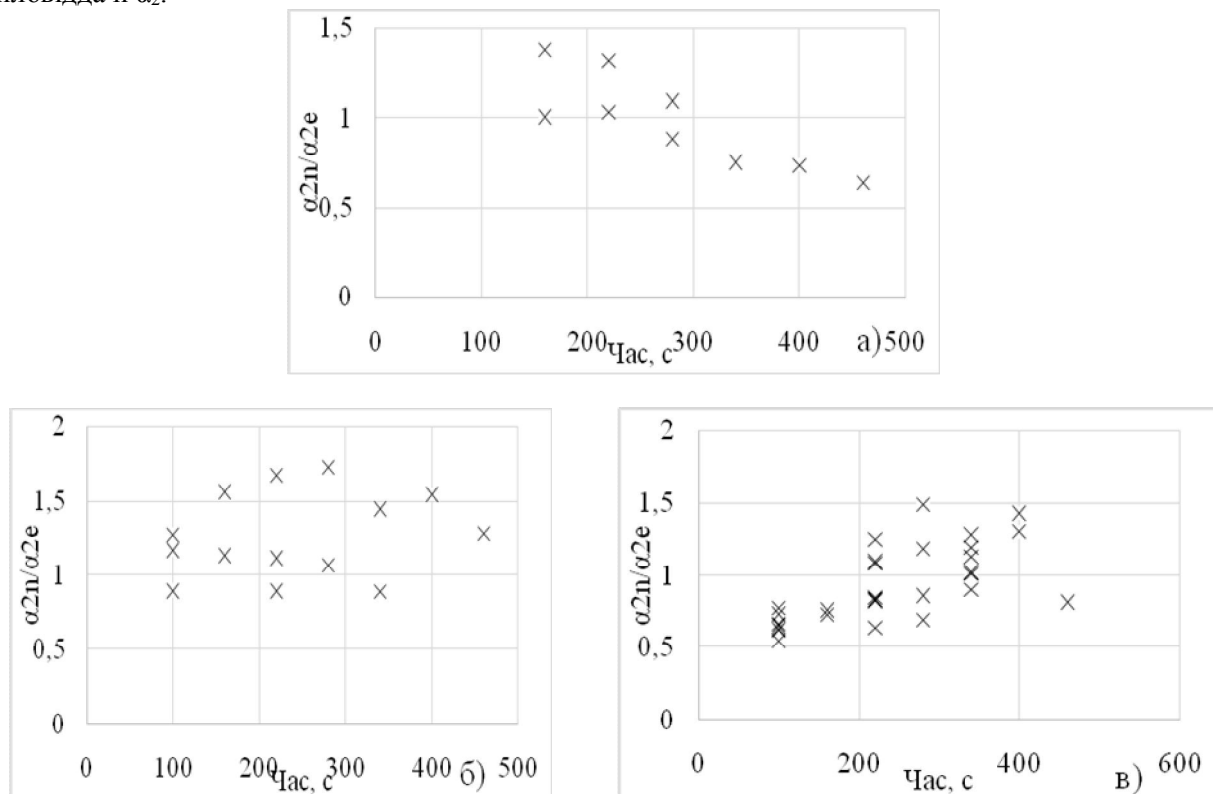


Рис. 3. Співвідношення $\alpha_{2\text{Nu}}/\alpha_{2\text{екс}}$ на протязі експерименту а, б, в – відповідно масові концентрації цукрового розчину 50, 60 і 70 %.

Аналогічно співставлено експериментальні $k_{\text{експ}}$ та розраховані за критеріальними залежностями k_{Nu} коефіцієнти теплопередачі (рис. 4).

Розбіжність між експериментальними та розрахованими за критеріальними залежностями коефіцієнтами теплопередачі складає 40 %, а в окремих випадках досягає 45%. Це можна пояснити застосуванням методики обробки експериментальних даних розробленої для стаціонарних режимів теплопереносу, тоді як у елементах установки відбуваються нестационарні режими.

Важливим висновком є те, що обробка результатів за даною методикою дає можливість визначити порядок коефіцієнта тепловіддачі, що досить важливо на початкових етапах формулювання завдань дослідження. Отже, для більш точної оцінки закономірностей процесу теплообміну необхідно розробляти і використовувати методи дослідження нестационарного теплообміну.

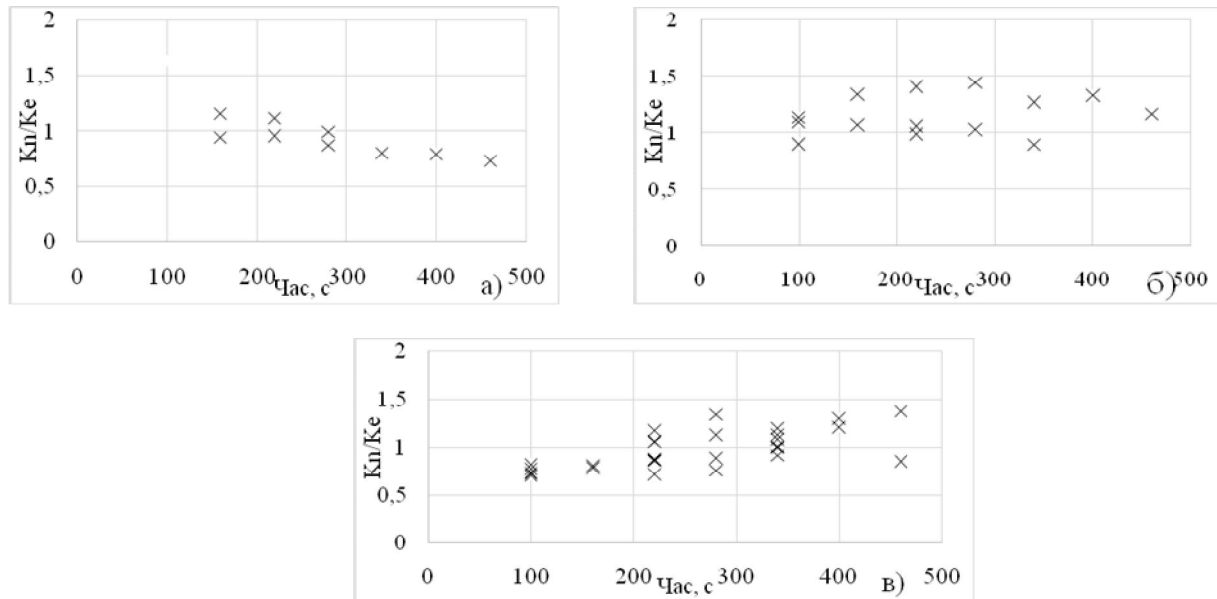


Рис. 4. Співвідношення K_{Nu}/K_{Ke} на протязі експерименту а, б, в – відповідно масові концентрації цукрового розчину 50, 60 і 70%.

3. Висновки

Експериментально досліджена нестационарна теплопередача від нагрітої води через тонку циліндричну металеву стінку до цукрового розчину 3-х масових концентрацій: 50%, 60% та 70% твердої частини, який знаходиться в циліндричній посудині обмеженого об'єму. Діапазон зміни температур гріючого середовища 78-42 °С, нагріваного – 20-65°С. Температура навколишнього середовища за межами системи 22-30 °С. Встановлена розбіжність до 40 – 45% експериментальних значень коефіцієнтів теплопередачі від води до розчину і їх значень розрахованих з застосуванням критеріальних залежностей для умов стаціонарного теплообміну у великому об'ємі.

Таким чином, для наближеної оцінки α_2 та k придатні залежності, виведені для стаціонарного режиму і великого об'єму. Явно виражених ефектів «спряженої задачі теплообміну» в дослідженому діапазоні параметрів не виявлено. В подальшому доцільно застосовувати методи, які орієнтовані на нестационарні процеси.

Список використаних джерел

- Осипова В. А. Экспериментально исследование процессов теплообмена. Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1979. — 320 с.
- Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. — [3-е изд. доп.]. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
- Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник / А. В. Лыков. — М.: «Энергия», 1971. — 560 с.
- Ткаченко С. Й. Нові методи визначення інтенсивності теплообміну в системах переробки органічних відходів / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна. — Вінниця: ВНТУ, 2017. — 148 с.
- Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. — Издание второе, дополненное и переработанное. — М.: Пищевая промышленность, 1980. — 288 с.
- Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. Второе дополненное издание. — М.: Пищевая промышленность, 1970. — 185 с.
- С. Й. Ткаченко, Д. І. Денесяк Ефективний коефіцієнт теплопровідності за умов теплообміну в обмеженому просторі [Електронний ресурс] режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/16961/3161.pdf?sequence=3>

References

- Osipova V. A. Eksperimentalnoe issledovanie protsessov teploobmena. Ucheb. posobie dlya vuzov. — 3-e izd., pererab. idop. — M.: Energiya, 1979. — 320 s.
- Isachenko V. P. Teploperedacha : uchebn. dlyavuzov / V. P. Isachenko [i dr.]. — [3-e izd. dop.]. — M.: Energiya, 1975. — 488 s.



- [3] Lyikov A. V. Teplomassoobmen. Spravochnik / A. V. Lyikov. – М.: «Energiya», 1971. – 560 s.
- [4] Tkachenko S. J. Novi metody vyznachennya intensyvnosti teploobminu v systemax pererobky organichnykh vidxodiv / S. J. Tkachenko, N. V. Pishenina. – Vinny`cya: VNTU, 2017. – 148 s.
- [5] Ginzburg A.S. idr. Teplofizicheskie harakteristiki pischevyih produktov. Spravochnik. — Izdanievtoroe, dopolnennoeipererabotannoe. — М.: Pischevayapromyishlennost, 1980. — 288 s.
- [6] Chubik I.A., Maslov A.M. Spravochnik po teplofizicheskim harakteristikam pischevyih produktov i polufabrikatov. Vtoroe dopolnennoe izdanie. — М.: Pischevaya promyishlennost, 1970. — 185 s.
- [7] S. J. Tkachenko, D. I. Denesyak Efekty`vny`j koefitsiyent teploprovodnosti za umov teploobminu v obmezhennomu prostori [Elektronny`jresurs] rezhy`m dostupu: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/16961/3161.pdf?sequence=3>

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ «ВОДА-СТЕНКА-ВЯЗКАЯ ЖИДКОСТЬ»

Експериментально досліджено нестационарна теплопередача від нагрітої води через тонку циліндричну металічну стінку до цукраного розчину, який знаходиться в циліндричному судині обмеженого об'єму. Встановлено розходження до 40 - 45% експериментальних значень коефіцієнтів теплопередачі від води до розчину і теплоотдачі від циліндричної стінки до розчину і їх значень розрахованих за застосування критеріальних залежностей для умов стаціонарного теплообміну в великому об'ємі.

Явно виражених ефектів «спряженої задачі теплообміну» в досліджуваному діапазоні параметрів не виявлено.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен; коэффициент теплоотдачи; коэффициент теплопередачи; экспериментально-расчетный метод, большой объем; ограниченный объем, сопряженная задача теплообмена

Ф. 8. Рис. 4. Лит. 7.

NON-STATIONARY HEAT EXCHANGER IN THE SYSTEM "WATER-WALL-BOILER LIQUID

An unsteady heat transfer from the heated water through a thin cylindrical metal wall to a sugar solution, which is in a cylindrical vessel of limited volume, is experimentally investigated. The discrepancy of up to 40 - 45% of the experimental values of the coefficients of heat transfer from water to solution and heat transfer from the cylindrical wall to the solution and their values calculated with the use of criterion dependences for the conditions of stationary heat transfer in a large volume are established.

The explicit effects of the "conjugate heat exchange problem" in the investigated range of parameters were not revealed.

Keywords: non-stationary heat exchange; coefficient of heat transfer; coefficient of heat transfer; experimental-calculation method; large volume; limited volume, conjugate heat transfer problem.

F. 8. Fig. 4. Ref. 7.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Денесяк Дмитро Іванович – аспірант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: doc13energee@gmail.com).

Денесяк Дмитрій Іванович – аспірант Вінницького національного аграрного університету (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: doc13energee@gmail.com).

Deniyasch Dmitry – Postgraduate Student of Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnyschna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: doc13energee@gmail.com).