
Коефіцієнт тепловіддачі в рідині за умов регулярного теплового режиму

Ольга Власенко

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
ORCID 0000-0002-8975-0873

Станіслав Ткаченко

Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця,
Україна
ORCID 0000-0002-4904-4608

Олександр Недбайло

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, Україна
ORCID 0000-0003-1416-9651

Олександр Мошков

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
ORCID 0009-0007-9918-4063

Ігор Мельниченко

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
ORCID 0009-0006-3359-023X

Для цитування цієї статті:

Власенко Ольга, Ткаченко Станіслав, Недбайло Олександр, Мошков Олександр, Ігор Мельниченко. Коефіцієнт тепловіддачі в рідині за умов регулярного теплового режиму. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 4, No. 2, 2025, pp. 140-152. doi: 10.46299/j.isjea.20250402.09.

Надійшла до редакції: 18 лютого 2025 р.; **Схвалено:** 19 березня 2025 р.;

Опубліковано: 01 квітня 2025 р.

Анотація: Проведено експериментальне дослідження процесу теплообміну при вимушеній конвекції цукрового розчину в умовах його нагрівання (охолодження). Сформульована мета дослідження, яка передбачає встановлення можливості існування регулярного теплового режиму при охолодженні (нагріванні) в «складному тілі» за умов вимушеної конвекції цукрового розчину в циліндричній тонкостінній металевій посудині; використання методів регулярного теплового режиму для визначення інтенсивності теплообміну між циліндричною металевою стінкою і дослідною рідиною. Експериментально встановлено, що на проміжку часу, в якому досліджується охолодження (нагрівання) цукрового розчину реалізується регулярний тепловий режим. Протягом дослідної стадії регулярного теплового режиму темп охолодження (нагрівання) дослідної рідини залишається незмінним і не залежить від часу. Середньооб'ємна температура «складного тіла» відрізняється від середньооб'ємної температури дослідної рідини на $0,01 \div 0,03^\circ\text{C}$. Коефіцієнт

тепловіддачі між внутрішньою поверхнею металевої стінки циліндричної посудини і дослідною рідиною рекомендується визначати з врахуванням методів регулярного теплового режиму, тобто темпу охолодження (нагрівання) дослідної рідини, коефіцієнту нерівномірності розподілу температур. Нестационарні методи дозволяють проводити велику кількість вимірювань різномірних даних одночасно, потребують меншої кількості вимірювальних засобів і їм притаманна більш проста організація проведення випробування. Встановлено, що величини коефіцієнтів тепловіддачі, визначені за методами регулярного теплового режиму, тобто методами нестационарного теплообміну, і відомим розрахунково-експериментальним методом – методом обробки результатів стаціонарного теплообміну, мають між собою розбіжність, яка при нагріванні не перевищує 15%, а при охолодженні – 20%.

Ключові слова: експериментальне дослідження, нестационарний теплообмін, регулярний тепловий режим, темп охолодження (нагрівання), складне тіло, дослідна рідина, конвекція, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт нерівномірності розподілу температур, нестационарні методи.

1. Вступ

Передача теплоти відбувається за рахунок переміщення теплової енергії від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою. Цей природний потік відбувається до тих пір, поки не буде досягнуто теплової рівноваги, коли температура стає рівномірною по всій системі. Розуміння цього принципу має ключове значення для розуміння механізмів процесів теплопередачі.

Якщо два об'єкти з різною температурою стикаються один з одним, енергія передається від більш гарячого об'єкта (тобто об'єкта з вищою температурою) до більш холодного (нижчої температури), доки обидва об'єкти не матимуть однакову температуру. Чиста теплопередача відсутня, коли температури рівні, тому що кількість тепла, що передається від одного об'єкта до іншого, така сама, як кількість тепла, що повертається. Одним із основних ефектів теплообміну є зміна температури: нагрівання підвищує температуру, а охолодження знижує її. Досліди показують, що теплота, яка передається речовині або від неї, залежить від трьох факторів – зміни температури речовини, маси речовини та певних фізичних властивостей, пов'язаних із фазою речовини [2].

Теплопровідність передбачає передачу тепла від однієї молекули до сусідньої молекули у вигляді непружного зіткнення у випадку рідин, у вигляді коливань у твердих непровідних речовинах і у вигляді руху електронів у провідних твердих тілах, таких як метали [3].

Теплопередачу можна кількісно визначити за допомогою закону Фур'є, який включає важливу теплофізичну властивість – теплопровідність. Теплопровідність матеріалу є показником того, наскільки ефективно матеріал передає теплоту. Коефіцієнти теплопровідності матеріалів дуже різні, причому теплопровідність найвища для металів, нижча для неметалів, рідин і газів. Будь-який матеріал з низькою електропровідністю можна вважати теплоізолятором. Тверді речовини з високою теплопровідністю можуть бути використані як теплоізолятори [3].

Теплопередача може відбуватися за допомогою трьох основних механізмів: теплопровідність, конвекція та випромінювання [1].

Теплопровідність передбачає прямий контакт двох об'єктів з різною температурою. Мікроскопічні коливання гарячих об'єктів передають теплову енергію більш холодним об'єктам під час контакту. Такі метали, як мідь, демонструють високу теплопровідність, ефективно передають тепло, тоді як такі матеріали, як дерево, є поганими провідниками, що робить їх ефективними ізоляторами. Молекулярний механізм проведення: у твердих тілах передача тепла шляхом теплопровідності відбувається через безпосередню взаємодію сусідніх частинок. Коли гарячий об'єкт стикається з холоднішим, більш рухомі частинки гарячого об'єкта стикаються з менш рухомими частинками холоднішого об'єкта. Ці зіткнення

передають кінетичну енергію від гарячих частинок до більш холодних частинок, змушуючи їх рухатися швидше. Цей процес передачі енергії продовжується вздовж ланцюжка частинок, що призводить до поступового нагрівання більш холодного об'єкта [1].

Швидкість теплопередачі шляхом теплопровідності залежить від кількох факторів, зокрема:

- теплопровідність: здатність матеріалу проводити тепло. Метали, як правило, мають вищу теплопровідність, ніж неметали.
- різниця температур: чим більша різниця температур між двома об'єктами, тим вища швидкість передачі тепла.
- площа поверхні: чим більша площа контактної поверхні, тим швидше швидкість передачі тепла.

Теплопровідність відноситься до внутрішньої здатності матеріалу передавати або проводити тепло. Теплопровідність матеріалу має багато наслідків. Він є основоположним у проектуванні, розробці та застосуванні матеріалів у середовищах, де теплопередача є критичним фактором.

Теплопровідність виникає через молекулярне перемішування та контакт і не призводить до об'ємного руху самого твердого тіла. Тепло рухається вздовж градієнта температури від області високої температури та високої молекулярної енергії до області з нижчою температурою та нижчою молекулярною енергією. Теплопередача триватиме, доки обидва об'єкти не досягнуть однакової температури, відомої як тепла рівновага. Швидкість теплопередачі залежить від величини температурного градієнта та специфічних теплових характеристик матеріалу.

Розуміння теплопровідності має важливе значення для оптимізації систем керування теплом, підвищення енергоефективності, забезпечення безпеки, скерування вибору матеріалів, стимулювання інновацій та покращення продуктивності та стійкості продуктів і процесів.

Конвекція – це передача теплової енергії від руху рідини (це може бути рідина або газ). Він відрізняється від теплопередачі та теплопровідності (що включає прямий контакт між частинками в системі) і радіаційної теплопередачі (що передбачає передачу тепла через випромінювання електромагнітних хвиль). При конвекції рух частинок рідини передає енергію з одного місця в інше, що призводить до передачі тепла.

Існує два типи конвекції: природна конвекція і вимушена конвекція. Природна конвекція – це спосіб руху рідини завдяки природним факторам, таким як ефект плавучості, коли різниця температур у рідині спричиняє циркуляційну схему потоку від підйому теплішої рідини та опускання холоднішої рідини. З іншого боку, примусова конвекція переміщує рідину за допомогою зовнішньої сили, наприклад, вентилятора або насоса для збільшення теплопередачі.

Конвекція передбачає передачу теплоти через рух рідин чи газів. Коли рідина нагрівається, вона розширюється і стає менш щільною, змушуючи її підніматися. Це явище є очевидним у повсякденних подіях, таких як підйом теплого повітря або кипіння води. Механізм конвекції: теплообмін конвекцією відбувається в рідинах за рахунок руху нагрітих частинок. Коли рідина нагрівається, частинки поблизу джерела теплоти поглинають енергію та починають рухатися швидше. Це змушує їх розширюватися та ставати менш щільними, що робить їх плавучими та піднімаються вгору. Коли нагріті частинки піднімаються, вони витісняють холодніші, щільніші частинки, які опускаються вниз. Ця безперервна циркуляція рідини створює конвекційні потоки, переносячи теплоту по всій рідині [1].

Як і теплопровідність, передача тепла шляхом конвекції відбувається за рахунок руху молекул. Однак під час конвекції молекули також транспортуються або переміщуються через рух рідини. Конвекція кількісно визначається за допомогою закону охолодження Ньютона, який включає коефіцієнт теплопередачі. Як і теплопровідність, коефіцієнт теплопередачі є

функцією теплофізичних властивостей рідини; однак це також є функцією фізичних характеристик системи, таких як швидкість рідини та форма поля потоку [3].

Випромінювання. На відміну від теплопровідності та конвекції, випромінювання не потребує середовища для передачі тепла. Воно передбачає випромінювання електромагнітних хвиль, у тому числі інфрачервоного випромінювання, об'єктами через їхню температуру [1]. Всі матеріали, незалежно від температури, випромінюють у всіх напрямках. Передача енергії випромінюванням унікальна тим, що не потрібна провідна речовина, як це потрібно для теплопровідності та конвекції. Іншими словами, радіаційний теплообмін може відбуватися у вакуумі. Радіаційний теплообмін кількісно визначається законом Стефана-Больцмана [3].

2. Об'єкт і предмет дослідження

Теплообмінні процеси в багатозфазних і багатокомпонентних середовищах. Інтенсивність теплообміну в багатозфазних і багатокомпонентних середовищах.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне встановлення можливості існування регулярного теплового режиму при охолодженні (нагріванні) цукрового розчину в циліндричній тонкостінній металевій посудині в умовах його вимушеної конвекції; використання методів регулярного теплового режиму для визначення величин коефіцієнтів тепловіддачі між циліндричною металевою стінкою і дослідною рідиною.

4. Аналіз літератури

Успішний розвиток промисловості можливий лише при створенні прогресивних теплотехнологій та високоефективного обладнання за умов захисту навколишнього середовища. Створення високоефективного теплоенергетичного обладнання потребує дослідження методів інтенсивності гідродинамічних та теплових процесів.

Для інтенсифікації процесів в ємностях використовуються змішувальні пристрої різного типу. Це дозволяє в рідинах з високою в'язкістю зменшувати термічний опір в теплових процесах.

Інтенсифікація виробничих процесів у всіх галузях переробної промисловості є загальним напрямком науково-технічного прогресу. Тому пошук науково обґрунтованих методів прогнозування інтенсивності теплообміну в умовах його інтенсифікації є досить важливою задачею [4].

Якщо матеріали, тверді речовини, рідини або гази, нагріти або охолодити, багато їхніх властивостей змінюються. Це пов'язано з тим, що тепла енергія, яка надходить до зразка або відводиться від нього, змінює кінетичну або потенційну енергію складових атомів та молекул. У першому випадку змінюється температура зразка, оскільки температура є мірою середньої кінетичної енергії елементарних частинок зразка. У другому випадку, наприклад, енергія зв'язку цих частинок змінюється, що може спричинити фазовий перехід.

Теплові властивості пов'язані із реакцією, яка залежить від матеріалу, коли теплота подається до твердого тіла, рідини чи газу. Цією реакцією може бути підвищення температури, фазовий перехід, зміна довжини або об'єму, початок хімічної реакції або зміна якоїсь іншої фізичної чи хімічної величини.

Під тепловим регулярним режимом тіла або системи тіл розуміють такий процес охолодження або нагрівання системи, коли: початковий розподіл температури в системі не впливає на закон зміни температури; закон зміни температури виражається в простій математичній формі; цей закон є загальним для всіх точок системи.

Ці закономірності теплового регулярного режиму дозволили розробити ряд методів визначення теплових характеристик різних матеріалів, визначити теплову інерцію термометрів і пірометрів, отримати співвідношення для розрахунку кінетики охолодження або нагрівання складних на той час нетехнічних апаратів і обладнання.

У розглянутих стаціонарних методах при постійному тепловому потоці встановлюються постійні в часі температури системи і проводяться вимірювання. Процес трудомісткий і займає багато часу. Виникає необхідність застосування охоронних нагрівачів. Нестационарні методи засновані не на визначенні теплового потоку, а на вимірюванні зміни температурного поля зразка.

Будь-який процес охолодження або нагрівання тіла можна умовно поділити на три режими. Перший режим охоплює початок процесу, коли характерною особливістю є поширення температурних збурень у просторі та захоплення все нових шарів тіла. Швидкість зміни температури в окремих точках різна, а поле температур сильно залежить від початкової температури. Тому перший режим характеризує початкову стадію процесу.

Другий режим. З часом вплив початкових параметрів згладжується і відносна швидкість зміни температури у всіх точках тіла стає постійною – режим упорядкованого процесу. Другий режим прийнято називати регулярним режимом 1-го роду.

Третій режим – після тривалого часу настає третій режим (стаціонарний режим), коли температури у всіх точках тіла однакові і рівні температурі навколишнього середовища.

Процес теплообміну між двома рідинами, які мають різні температури та розділені суцільною стінкою, відбувається в багатьох інженерних задачах. Пристрій, який використовується для здійснення цього обміну, називається теплообмінником, і його конкретні застосування можна знайти в опаленні та кондиціонуванні приміщень, виробництві електроенергії, утилізації відпрацьованого тепла та хімічній обробці. Потік тепла від рідини через тверду стінку до іншої рідини часто зустрічається в хіміко-технічній практиці. Передане тепло може бути прихованим теплом, що супроводжує фазові зміни, такі як конденсація чи випаровування, або це може бути відчутне тепло, що надходить від підвищення чи зниження температури рідини без фазових змін [5].

Теплопровідність і питома теплоємність є важливими теплофізичними властивостями, які описують явища теплопередачі, що відбуваються в різних видах матеріалів. Серед цих властивостей теплопровідність відіграє значну роль у тепловому дизайні матеріалів, призначених для розсіювання виробленого тепла, перш за все в перехідному режимі.

Для визначення наведених вище властивостей зазвичай використовуються добре відомі методи вимірювання.

Коефіцієнт теплопровідності є важливою теплофізичною властивістю, яка відіграє важливу роль в аналізі перехідних явищ теплопередачі. Коефіцієнт теплопровідності важливий у задачах термічного або перехідного теплового навантаження. Це також важливий фактор у теплових розрахунках матеріалів, призначених для розсіювання генерованого тепла, коли ці процеси мають нестационарний характер [6].

У зв'язку з тим, що при термічній обробці змінюються властивості продуктів і зокрема їх теплофізичні властивості, велике значення має розробка методів, що дозволяють визначати еквівалентні характеристики безпосередньо в процесі обробки або при створенні аналогічних умов з урахуванням явищ, що накладаються на теплообмін (масообмін, фазовий перехід, хімічні реакції та ін.) [6].

При виборі методів визначення теплофізичних властивостей матеріалів слід враховувати наступне: вибрані методи та методики повинні надійно забезпечувати у досвіді крайові тепло- та масообмінні умови, що відповідають цим умовам у конкретному технологічному процесі; доцільно вибирати комплексний метод, який дозволяє за один експеримент, з одним зразком та на одному приладі визначити три або, у крайньому випадку, дві теплофізичні властивості [7].

Для вдосконалення та оптимізації технологічних процесів необхідні науково-обґрунтовані інженерні розрахунки, які потребують інформації про теплопровідність, теплоємність, щільність та температуропровідність робочого матеріалу в широкому інтервалі параметрів стану.

Таким чином, сучасний стан дослідження теплофізичних властивостей не можна вважати задовільним, тому дослідження теплофізичних властивостей різних рідин та їх розчинів має велике практичне значення. Тому актуальним є вдосконалення та оптимізація технологічних процесів, проведення науково обґрунтованих інженерних розрахунків, що спираються на дані про теплопровідність, теплоємність, щільність та температуропровідність рідин у широкому інтервалі температур і тисків [7].

Для визначення теплофізичних властивостей застосовують теорії та методи регулярного теплового режиму при охолодженні (нагріванні) тіла при змінних теплових коефіцієнтах. Опис процесу формулами регулярного режиму можливий і має сенс, але в цьому випадку теплові коефіцієнти, що визначають швидкість, є усередненими в деякому інтервалі температур. Метод регулярного режиму підходить для визначення змінної теплоємності $c_p(t)$ і змінного коефіцієнта теплопередачі при низькому значенні коефіцієнта Біо (Bi), але не має сенсу для визначення змінної теплопровідності $\lambda(t)$ при середньому та високому значенні коефіцієнта Біо [7, 8].

5. Методи досліджень

Експериментальні методи теплового регулярного режиму зазвичай застосовуються для визначення теплофізичних властивостей різних видів матеріалів. Ці методи базуються на вимірюванні перехідного температурного поля тіла під час процесів нагрівання або охолодження.

Визначення та оцінку значень теплофізичних властивостей матеріалів слід пов'язувати з іншими їх властивостями, і навіть з методами їхньої обробки у різних технологічних процесах, тобто визначати реальні властивості матеріалів.

З використанням отриманих значень теплофізичних властивостей до розрахунку виробничих процесів і установок, можливі великі похибки, оскільки умови проведення експериментів часто від виробничих умов.

Дослідження проводяться на експериментальній установці [9, 10] на цукрових розчинах концентрацією $C = 60, 70\%$ при обертах пропелерної мішалки 26, 34, 54 об/хв, яким відповідають умовні характерні швидкості на крайній точці пропелера $w = 0,22, 0,28, 0,45$ м/с. Умовна характерна швидкість $\bar{w} = \pi \cdot n \cdot d_m / 60$, м/с; де n – частота обертання мішалки, об/хв; $d_m = 0,08$ м – діаметр мішалки.

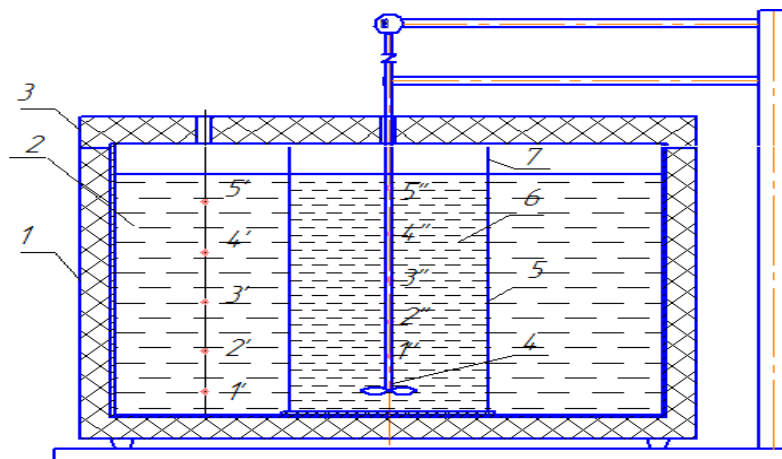


Рис. 1. Схема експериментальної установки.

Експериментальна установка [9, 10] більш детально показана на рис. 1. Складається з ізольованої зовнішньої посудини 1, навколишнього середовища (води) 2, ізольованої металеві кришки 3, пропелерної мішалки 4, внутрішньої тонкостінної посудини 5, дослідної рідини 6, запобіжника перетoku газового середовища над поверхнею води і поверхнею дослідної рідини 7. Зовнішня посудина 1 представляє собою металеву ємність висотою 120 мм і діаметром 200 мм, на яку нанесена теплоізоляція. Температури навколишнього середовища 2 і дослідної рідини 6 заміряються по висоті у 10-ти точках. Маса навколишнього середовища 6 (води) – $M = 2,9$ кг, маса дослідної рідини 5 – $m = 0,9$ кг.

Введено поняття «складне тіло», яке включає крім дослідної рідини 6 внутрішню тонкостінну посудину 5, пропелерну мішалку 4, що в аспекті теплосприймання призводить до відхилення T_2 «складного тіла в цілому» від T_2 дослідної рідини в межах $0,015 \div 0,041^\circ\text{C}$.

Поняття регулярного теплового режиму обґрунтовано для твердого тіла, систем твердих тіл [10]. Для «складного тіла» нам невідомі джерела інформації, в яких встановлено існування регулярного теплового режиму в процесі нестационарного теплообміну.

За результатами вимірювань температури формуємо початкову базу експериментальних даних у вигляді $\bar{T}_1, \bar{T}_2 = f(\tau)$, де $\bar{T}_1, \bar{T}_2$ – осереднені по висоті температури води і дослідної рідини, відповідно. Середньооб'ємна температура «складного тіла» і дослідної рідини відрізняється на величину $(0,01 \div 0,03)^\circ\text{C}$, яка встановлена розрахунками під час обробки експериментальних даних. Визначаються осереднені значення надлишкової температури ϑ в заплановані інтервали часу, $\vartheta = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$. На основі систематизованої інформації бази даних $\vartheta = f(\bar{T}_1, \bar{T}_2) = f(\tau)$ будується залежність $\text{Ln}\vartheta = f(\tau)$.

На рис. 2, для прикладу, наводяться результати обробки експериментальних даних лише цукрового розчину $C=70\%$.

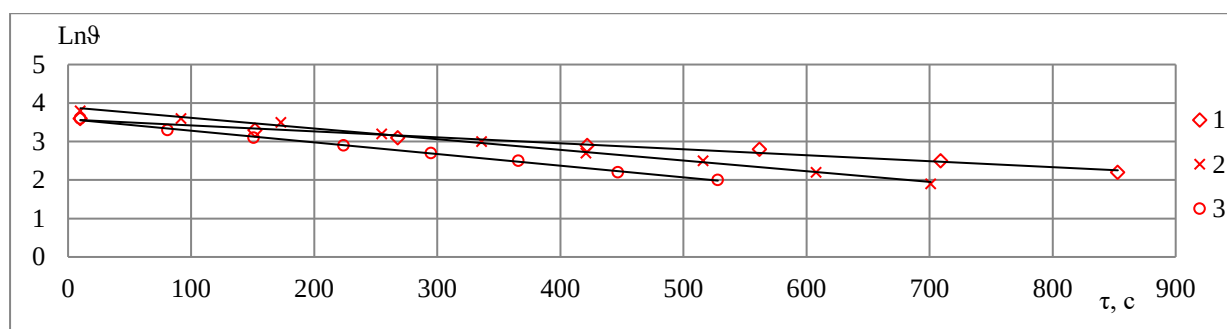


Рис. 2. Зміна надлишкової температури «складного тіла» за часом в умовах нагрівання цукрового розчину $C=70\%$ при таких швидкостях: 1 – 0,22 м/с; 2 – 0,28 м/с; 3 – 0,45 м/с.

Криві (рис. 2) представляють результати апроксимації залежності логарифму надлишкової осередненої температури дослідної рідини у внутрішній посудині від часу $\text{Ln}\vartheta = m \cdot \tau + C$: m – темп охолодження (нагрівання), C – константа.

6. Результати досліджень

Практично темп охолодження (нагрівання) m дослідної рідини визначається таким чином, с^{-1} [3]

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (1)$$

де ϑ_1, ϑ_2 – надлишкова середньооб'ємна температура дослідної рідини у внутрішній посудині в моменти часу τ_1, τ_2 , $^\circ\text{C}$.

Таблиця 1. Результати обробки експериментальних даних на цукровому розчині C=60%.

№ п/п	Умовна характерна швидкість, м/с	Процес	Функція вигляду $\ln\theta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	0,22	Нагрівання	$y = -0,0032x + 3,4244$	$R^2 = 0,99$
2	0,28	Нагрівання	$y = -0,0024x + 3,4959$	$R^2 = 0,9888$
3	0,45	Нагрівання	$y = -0,0025x + 3,5823$	$R^2 = 0,9854$
4	0,22	Охолодження	$y = -0,002x + 3,5125$	$R^2 = 0,9969$
5	0,28	Охолодження	$y = -0,0039x + 3,2886$	$R^2 = 0,996$

Таблиця 2. Результати обробки експериментальних даних на цукровому розчині C=70%.

№ п/п	Умовна характерна швидкість, м/с	Процес	Функція вигляду $\ln\theta = m \cdot \tau + C$	Коефіцієнт детермінації R^2
1	0,22	Нагрівання	$y = -0,0015x + 3,5727$	$R^2 = 0,9853$
2	0,28	Нагрівання	$y = -0,0028x + 3,8921$	$R^2 = 0,9943$
3	0,45	Нагрівання	$y = -0,003x + 3,5835$	$R^2 = 0,997$
4	0,22	Охолодження	$y = -0,0013x + 3,39$	$R^2 = 0,9916$
5	0,28	Охолодження	$y = -0,0024x + 2,8491$	$R^2 = 0,986$
6	0,45	Охолодження	$y = -0,0027x + 3,2828$	$R^2 = 0,999$

Коефіцієнти тепловіддачі $\overline{\alpha}_1$ між навколишнім середовищем (водою) 2 і зовнішньою поверхнею металевої стінки циліндричної посудини 5 визначаються за критеріальним рівнянням [11, 12] відповідно до режиму теплообміну у великому об'ємі за умов вільної конвекції з використанням інформації по температурам наведеним в початковій базі експериментальних даних: $\overline{\alpha}_1 = \frac{\overline{Nu}_1 \cdot \lambda_1}{H}$, де $\overline{Nu}_1$ – критерій Нуссельта; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища (води), Вт/(м·К); H – визначальний розмір (висота внутрішньої циліндричної посудини, яка ззовні омивається водою, H = 0,1 м). Коефіцієнти тепловіддачі знаходяться локальні в часі $\overline{\alpha}_1$ і середні значення для всього діапазону часу дослідження $\overline{\alpha}'_1$. Відхилення між даними значеннями представлені в табл. 3-4. Для цукрового розчину C=60% в умовах охолодження (нагрівання) під час вимушеної конвекції при різних швидкостях руху дане відхилення складає до 30%, для цукрового розчину C = 70% – до 19%.

Таблиця 3. Коефіцієнти тепловіддачі між навколишнім середовищем і зовнішньою поверхнею металевої стінки циліндричної посудини при охолодженні (нагріванні) цукрового розчину C=60%

№ п/п	Умовна характерна швидкість, м/с	Процес	Середнє значення $\overline{\alpha}'_1$ для всього діапазону часу дослідження, Вт/(м ² ·К)	Відхилення $\overline{\alpha}_1$ від $\overline{\alpha}'_1$, %
1	0,22	Нагрівання	783	5-25
2	0,28	Нагрівання	837	8-26
3	0,45	Нагрівання	826	3-29
4	0,22	Охолодження	806	5-30
5	0,28	Охолодження	794	5-35

Таблиця 4. Коефіцієнти тепловіддачі між навколишнім середовищем і зовнішньою поверхнею металевої стінки циліндричної посудини при охолодженні (нагріванні) цукрового розчину $C=70\%$

№ п/п	Умовна характерна швидкість, м/с	Процес	Середнє значення $\bar{\alpha}'_1$ для всього діапазону часу дослідження, Вт/(м ² ·К)	Відхилення $\bar{\alpha}_1$ від $\bar{\alpha}'_1$, %
1	0,22	Нагрівання	623	5-12
2	0,28	Нагрівання	741	5-14
3	0,45	Нагрівання	989	15-25
4	0,22	Охолодження	663	1-17
5	0,28	Охолодження	589	5-19
6	0,45	Охолодження	676	1-22

Коефіцієнти нерівномірності розподілу температур [9] $\bar{\psi} = \vartheta_f / \vartheta_v$, де ϑ_v – надлишкова температура дослідної рідини по відношенню до температури навколишнього середовища $\vartheta_v = |\bar{T}_1 - \bar{T}_2|$, °С; ϑ_f – надлишкова температура стінки $\bar{T}_{ст}$ по відношенню до температури навколишнього середовища $\vartheta_f = |\bar{T}_1 - \bar{T}_{ст}|$. Знаходиться значення $\bar{\psi}$ локально в часі і середні значення для всього діапазону часу дослідження $\bar{\psi}'$, відхилення між вказаними значеннями представлені в табл. 5-6. Для дослідних рідин в умовах охолодження (нагрівання) під час вимушеної конвекції при різних швидкостях руху дане відхилення складає до 27% [10, 13].

Таблиця 5. Коефіцієнти нерівномірності розподілу температур дослідної рідини при охолодженні (нагріванні) цукрового розчину $C=60\%$

№ п/п	Умовна характерна швидкість, м/с	Процес	Середнє значення $\bar{\psi}'$ для всього діапазону часу дослідження, Вт/(м ² ·К)	Відхилення $\bar{\psi}$ від $\bar{\psi}'$, %
1	0,22	Нагрівання	0,39	1-11
2	0,28	Нагрівання	0,27	1-6
3	0,45	Нагрівання	0,26	3-29
4	0,22	Охолодження	0,24	5-30
5	0,28	Охолодження	0,35	11-27

Таблиця 6. Коефіцієнти нерівномірності розподілу температур дослідної рідини при охолодженні (нагріванні) цукрового розчину $C=70\%$

№ п/п	Умовна характерна швидкість, м/с	Процес	Середнє значення $\bar{\psi}'$ для всього діапазону часу дослідження, Вт/(м ² ·К)	Відхилення $\bar{\psi}$ від $\bar{\psi}'$, %
1	0,22	Нагрівання	0,22	5-17
2	0,28	Нагрівання	0,26	4-26
3	0,45	Нагрівання	0,27	5-19
4	0,22	Охолодження	0,26	2-27
5	0,28	Охолодження	0,29	11-25
6	0,45	Охолодження	0,36	12-30

Виявлені ознаки підтверджують існування регулярного теплового режиму за умов вимушеної конвекції в дослідній рідині в «складному тілі», яке знаходиться в системі «вода в кільцевому об'ємі – тонка металева стінка – дослідна рідина в циліндричному об'ємі» [14].

Відома залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі між циліндричною металевою стінкою і дослідною рідиною за умов стаціонарного теплообміну має вигляд (розрахунково-експериментальний метод) [15, 16]

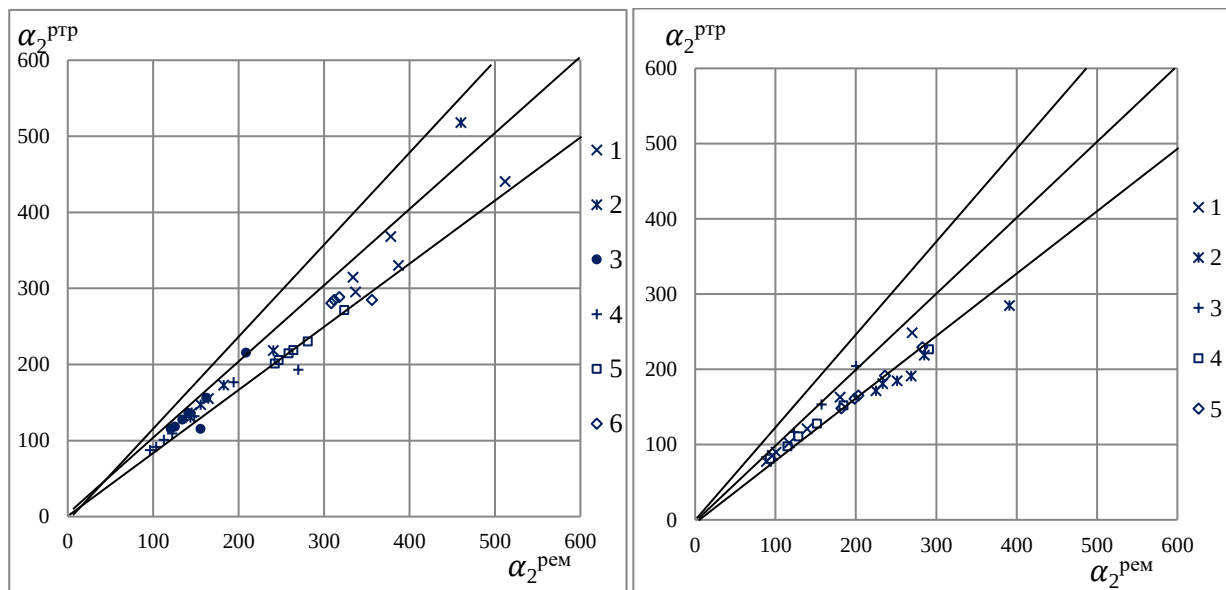
$$\overline{\alpha}_2^{\text{рем}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{експ}}} - \frac{1}{\overline{\alpha}_1} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}} \quad (2)$$

де $K_{\text{експ}} = Q/(F \cdot \overline{\Delta T})$ – експериментальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); Q – тепловий потік через циліндричну поверхню між навколишнім середовищем і дослідною рідиною, Дж; $\overline{\Delta T}$ – середній температурний напір між навколишнім середовищем і дослідною рідиною, °С; $F = 0,036$ – площа теплообмінної поверхні, м²; C_p – питома теплоємність дослідної рідини, Дж/(кг·К); $\delta_{\text{ст}}$ – товщина циліндричної металевої стінки внутрішньої посудини 5, м; $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопровідність циліндричної металевої стінки внутрішньої посудини 5, Вт/(м·К).

Встановлено існування регулярного теплового режиму в «складному тілі» (рис. 2, табл. 1 – 6). Коефіцієнт тепловіддачі між внутрішньою поверхнею металевої стінки циліндричної посудини і дослідною рідиною з врахуванням методів регулярного теплового режиму рекомендується визначати таким чином

$$\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{експ}}} - \frac{F \cdot \psi}{m \cdot C_p}} \quad (3)$$

На рис. 4 співставленні коефіцієнти тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$ в умовах нагрівання (а) і охолодження (б) цукрового розчину $C=60\%$ при w , м/с: 1 – 0,22; 2 – 0,28; 3 – 0,45; цукрового розчину $C=70\%$ при w , м/с: 4 – 0,22; 5 – 0,28; 6 – 0,45.



а) нагрівання
б) охолодження
Рис. 4. Співставлення коефіцієнтів тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$

Розбіжність результатів співставлення коефіцієнтів тепловіддачі $\overline{\alpha}_2^{\text{ртр}}$ і $\overline{\alpha}_2^{\text{рем}}$ (рис. 4) при нагріванні не перевищує 15%, при охолодженні – 20%.

Нестационарним методам притаманна більш проста організація проведення експерименту. Ці методи потребують меншої кількості вимірювальних засобів, дозволяють проводити більше число вимірювань різнорідних даних одночасно.

Таким чином, експериментально обґрунтовано застосування методів регулярного теплового режиму для прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі між циліндричною металевою стінкою і дослідною рідиною за умов вимушеної конвекції.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Термодинамічні властивості визначають стани рівноваги системи та включають такі властивості, як температура, тиск, щільність, внутрішня енергія, теплоємність, швидкість, ентальпія та ентропія.

Потреба в точних теплофізичних властивостях при проектуванні та аналізі інженерних систем добре встановлена. Промислове застосування різноманітних робочих рідин і твердих тіл вимагає різноманітних значень властивостей із високою точністю.

Методи регулярного теплового режиму дають можливість прогнозувати коефіцієнти тепловіддачі в реальних умовах теплообміну, що поглиблює знання про механізми теплообміну у в'язких рідинних середовищах, підвищує точність оцінки інтенсивності теплообміну.

Подальший розвиток дослідження буде базуватися на встановленні існування регулярного теплового режиму в багатофазному та багатокомпонентному середовищі з обмеженою інформацією по теплофізичним властивостям. А також застосуванні методів регулярного теплового режиму для визначення інтенсивності теплообміну до багатофазних та багатокомпонентних середовищ.

8. Висновки

1) Експериментально встановлено, що на проміжку часу, в якому досліджується охолодження (нагрівання) цукрового розчину у внутрішній тонкостінній посудині за умов вимушеної конвекції, витримується лінійна залежність $\ln(\vartheta) = f(\tau)$, яка характерна для регулярного теплового режиму в твердому тілі.

2) Встановлено, що величини коефіцієнтів тепловіддачі, визначенні за запропонованими методами регулярного теплового режиму і відомим розрахунково-експериментальним методом мають розбіжність, яка при нагріванні не перевищує 15%, а при охолодженні – 20%.

Отже, методи регулярного теплового режиму можуть бути застосовані для визначення інтенсивності тепловіддачі до рідин з відомою інформацією про теплофізичні властивості.

Список літератури:

- 1) Types of heat transfer [Online]. Rezhym dostupu: <https://www.dabedan.com/en/types-of-heat-transfer/>
- 2) Heat transfer specific heat capacity [Online]. Rezhym dostupu: <https://openstax.org/books/physics/pages/11-2-heat-specific-heat-and-heat-transfer>
- 3) Heat transfer [Online]. Rezhym dostupu: <https://www.accessscience.com/content/article/a311100?implicit-login=true>
- 4) Tkachenko S. Y., Pishenina N. V. Novi metody vyznachennia intensyvnosti teploobminu v systemakh pererobky orhanichnykh vidkhodiv : monohrafiia. Vinnytsia: VNTU, 2017. 148s.
- 5) Theodore L., Heat transfer applications for the practicing engineer, Wiley, New Jersey, 2011.
- 6) Method of a regular regime for the determination of variable thermal coefficients [Online]. Rezhym dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931061900461>
- 7) Determination of the thermal conductivity of material dividing the metallic core elements of the bi-calorimeter using modified theory [Online]. Rezhym dostupu: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-33751506968&origin=inward&txGid=4bbad9dcddc70acb46c71e279bd1a1bc>
- 8) The theory of thermal regular regime and its application to the determination of thermal characteristics [Online]. Rezhym dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931060900193>

9) Tkachenko S., Vlasenko O., Resident, N., Stepanov D., Stepanova N. Cooling and of the fluid in the cylindrical volume. Acta Innovations. 2021. No. 42. P. 15-26. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>

10) Tkachenko S. Y. Biohazovi tekhnolohii. Rehuliarnyi teplovyy rezhym : monohr. / S. Y. Tkachenko, O. V. Vlasenko. – Vinnytsia : VNTU, 2023. – 132 s. – ISBN-e 978-966-641-937-1. – ISBN 978-966-641-943-2. – URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/782>

11) Tkachenko S.I., Rezydent N.V., Denesiak D.I. Zastosuvannia metodiv rehuliarnoho teplovoho rezhymu dlia vyznachennia intensyvnosti teploobminu [Online]. Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/4865/3967>

12) Vlasenko, O., Tkachenko, S., Tkachuk, V. (2023). Study of a regular thermal regime in a liquid medium limited by a thin-walled metal cylinder. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2(4), 35–46. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230204.05>

13) Tkachenko, S., Vlasenko, O. (2022). Prohnozuvannia intensyvnosti teploobminu v biohazovomu vyrobnytstvi. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia, (3-4), 50–62. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.03.09>

14) Tkachenko S. Y., Vlasenko O. V., Stepanova N. D., Pavlovych Ye. O. Nestatsionarnyi teploobmin u vertykalnomu tsylindrychnomu ob'emi, zapovnenomu ridynoiu. Visnyk VPI. 2022. vyp. 1, s. 16–20. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-16-20>

15) Yushko S.V., Borshch O.Ie., Yushko M.A. Statsionarna teploprovidnist. Navchalnyi posibnyk. Kharkiv: NTU «KhPI», 80, 2011.

16) Pohorielov A. I. Teplomasoobmin (osnovy teorii i rozrakhunku). Navchalnyi posibnyk dlia vuziv. 2-he vydannia. Lviv: «Novyi Svit-2000», 2004.

Heat transfer coefficient in a liquid under conditions of regular thermal regime

Olha Vlasenko

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-8975-0873

Stanislav Tkachenko

Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
ORCID 0000-0002-4904-4608

Oleksandr Nedbailo

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0003-1416-9651

Oleksandr Moshkov

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0009-0007-9918-4063

Igor Melnichenko

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0009-0006-3359-023X

Abstract: An experimental study of the heat exchange process during forced convection of a sugar solution under conditions of its heating (cooling) was conducted. The goal of the study was formulated, which involves: establishing the possibility of the existence of a regular thermal regime during cooling (heating) in a "complex body" under conditions of forced convection of a sugar solution in a cylindrical thin-walled metal vessel; using methods of a regular thermal regime to determine the intensity of heat exchange between a cylindrical metal wall and the test liquid. It was experimentally established that during the time interval in which the cooling (heating) of the sugar solution is studied, a regular thermal regime is realized. During the studied stage of the regular thermal regime, the cooling (heating) rate of the test liquid remains unchanged and does not depend on time. The average volumetric temperature of the "complex body" differs from the average volumetric temperature of the test liquid by $0.01 \div 0.03^{\circ}\text{C}$. The heat transfer coefficient between the inner surface of the metal wall of a cylindrical vessel and the test liquid is recommended to be determined taking into account the methods of regular thermal regime, i.e. the rate of cooling (heating) of the test liquid, the coefficient of uneven temperature distribution. Non-stationary methods allow for a large number of measurements of heterogeneous data simultaneously, require a smaller number of measuring instruments and are characterized by a simpler organization of the test. It has been established that the values of heat transfer coefficients determined by the methods of regular thermal regime, i.e. by the methods of non-stationary heat exchange, and by the well-known computational and experimental method - the method of processing the results of stationary heat exchange, have a discrepancy between themselves, which does not exceed 15% during heating, and 20% during cooling.

Keywords: experimental study, non-stationary heat transfer, regular thermal regime, cooling (heating) rate, complex body, experimental fluid, convection, heat transfer coefficient, coefficient of non-uniform temperature distribution, non-stationary methods.
