



УДК 664.849:664.144

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-13

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ РОТОРНОГО ВИПАРНИКА З  
НАГРІВАЛЬНИМ ПЛІВКОУТВОРЮЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ**

**Полєвода Юрій Алікович**, к.т.н., доцент  
**Соломон Алла Миколаївна**, к.т.н., доцент  
**Підлипна Марина Петрівна**, аспірант  
Вінницький національний аграрний університет

**Yurii Polievoda**, Ph.D., Associate Professor  
**Alla Solomon**, Ph.D., Associate Professor  
**Maryna Pidlypna**, Postgraduate  
Vinnytsia National Agrarian University

*В статті досліджували модель роторного-плівкового випарника з плівкоутворюючим елементом, який має відбивальну поверхню, яка обігрівается. Таке рішення запропоновано для стабілізації гідравлічного руху зрізаємої хвильової течії за рахунок відбивальної поверхні певної геометричної форми для примусового спрямування сировини, що зрізається на нагрівальну поверхню. Автономний підігрів відбивальної поверхні додатково забезпечує температурний ефект в умовах переміщення часток сировини після зрізання.*

*У результаті аналізу експериментально-теоретичних параметрів теплообміну обґрунтовано критеріальне рівняння коефіцієнта тепловіддачі випарника з запропонованим плівкоутворюючим елементом, який має відбивальну обігрівальну поверхню для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні до сировини. Отримане рівняння враховує вплив вертикальної складової руху плівки сировини, відцентрове переміщення при обертанні плівкоутворюючого елемента, перемішування киплячої плівки сировини пухирцями пари, геометричних характеристик плівкоутворюючої лопати на гідродинамічний плин сировини.*

*Здійснено розрахунок роторного-плівкового випарника з використанням критеріального рівняння та отримано корисну поверхню теплообміну –  $0,75 \text{ м}^2$ . Питома металоемність в роторно-плівковому випарнику з плівкоутворюючим елементом, що має відбивальну поверхню становить  $57 \text{ кг/м}^2$  порівняно з традиційно використовуваним в консервних виробництвах вакуум-випарним апаратом  $410 \text{ кг/м}^2$ ; що у 7,1 раз менше. Також зменшується тривалість температурного впливу на сировину: роторно-плівковий випарник – 200 с та 3600 с у традиційному апараті. Отримані дані будуть корисні для проектування роторно-плівкових апаратів різних геометричних параметрів, що використовують шарнірні лопати з відбивальною пластиною.*

**Ключові слова:** коефіцієнт теплопередачі, роторно-плівковий випарник, критеріальне рівняння, плівкоутворюючий елемент, органічна сировина, технологічне переоснащення.

**Ф. 13. Рис. 1. Табл. 1. Літ. 13.**

---

**1. Постановка проблеми**

В багатьох сферах переробної та харчової промисловості при реалізації технологічних операцій в умовах виробництва різноманітних виробів використовують тепломасообмінні операції (підігрівання, витримування, уварювання тощо). Поєднання теплових операцій в єдиному комплексі тепломасообмінного обладнання дозволяє значною мірою інтенсифікувати апаратурно-технологічний комплекс в цілому, за рахунок ресурсоефективності, скоротити тривалість процесів та якість отриманої продукції [1]. При розробці сучасних комплексів головна увага приділяється впровадженню інноваційних інженерно-технологічних рішень з використанням математичного моделювання та прогнозування забезпечення ефективних апаратурно-технологічних властивостей в залежності від вхідних та вихідних параметрів.

У зв'язку з екологічними та пандемічними викликами сьогодення гостро стоїть питання з виробництва функціонально-фізіологічних інгредієнтів високого ступеня готовності та оздоровчо-профілактичних виробів високої якості органічного рослинного походження [1, 7]. Оскільки дана сировина є природним джерелом біологічно активних речовин, мікро- та мікроелементів тощо,



барвників та оригінальних органолептичних властивостей, що дозволить мінімізувати використання синтетичних домішок у технологічних операціях. А отже, отримувати якісні продукти харчування з підвищеною харчовою цінністю, лікувально-профілактичними властивостями для формування раціональної системи харчування, тим самим, формуючи імунну складову та зміцнення здоров'я в цілому [1, 8].

Забезпечення ресурсоефективності тепломасообмінних операцій можливе в умовах використання сучасних інноваційних рішень, в тому числі комплексів переробки вторинної енергії при переробці органічної сировини. Під час проектування теплового обладнання важливо провести конструктивні розрахунки для встановлення раціональних геометричних розмірів апарату та робочих органів, що в цілому забезпечить ресурсоефективність тепломасообмінного процесу. Від повноти врахування конструктивно-технологічних параметрів у критеріальному рівнянні, залежить якість реалізації процесу концентрування та отриманих кінцевих величин тепломасообмінного розрахунку (поверхня теплообміну, кількість витраченої теплоти тощо). Отже, впровадження при розробці сучасних випарних апаратів роторно-плівкового типу та адекватної розрахункової моделі з визначення коефіцієнта тепловіддачі дозволить визначити основні конструктивні параметри обладнання.

Для реалізації ресурсоефективних тепломасообмінних процесів концентрування, актуальним завданням є забезпечення якості отримуваних виробів за рахунок використання сучасних інженерно-технологічних рішень в умовах скорочення тривалості технологічних операцій. Одним з таких рішень є обґрунтування критеріального рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі роторно-плівкових випарників, що дозволить отримати розрахункові значення з максимальною достовірністю опису реальної картини ведення процесу тепломасообміну. Отриманні розрахункові данні дозволять забезпечити оптимальні геометричні розміри апарату під час проектування нового випарного обладнання роторного типу з врахуванням всіх факторів впливу на процес з метою досягнення їх ресурсоефективності. Запровадження оптимального моделювання і прогнозування раціональних тепломасообмінних операцій, зокрема для підвищення коефіцієнту тепловіддачі, забезпечить виробництво високоякісних виробів з забезпеченням їх конкурентоспроможності.

---

## 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

---

В роботах [1, 3] наведені маркетингові дослідження з актуальності впровадження ефективної переробки сировини на базі різноманітних технологічних процесів для отримання високоякісних конкурентоспроможних продуктів харчування. Це пов'язано з тим, що у порівнянні з традиційними аналогами, вдосконалені способи забезпечують кращу ресурсоефективність, за рахунок зменшення металоємності, скорочення технологічної та операційної тривалості, використання вторинної теплової енергії тощо. Проте не розкритими залишаються питання пов'язані державною підтримкою інвестиційних програм з форматування морально-застарілих комплексів, технологій тощо. Це в першу чергу пов'язано з тим, що більшість апаратурних комплексів характеризуються енерго- та металоємністю та навіть складно вдосконалюються, обумовлюючи пошук інноваційних технічних рішень для підтримки вітчизняної промисловості.

Так у роботах [4, 5] зазначається необхідність підвищення якості різноманітної продукції за рахунок постійного апаратурно-технологічного переоснащення для підвищення ресурсоефективності та дозволяє враховувати початкові і кінцеві властивості сировини, що переробляються. Зокрема в роботі [1] розроблена модель визначення взаємозв'язків енергетичних витрат при концентруванні не ньютонівських рідин в умовах обігріву робочої поверхні паровою сорочкою. Проте залишилися поза увагою експлуатаційно-технічна складність реалізації процесу, що призводить до зниження ресурсоефективності, а отже запропонована модель базується на розгляді окремих показників, а не процесу в цілому, потребуючи подальших досліджень.

В роботі [2] досліджується вдосконалена модельна конструкція плівкового випарника для аналітичного прогнозування тепломасообмінних процесів концентрування з урахуванням гідродинамічних та теплофізичних конструктивно-технологічних особливостей реалізації процесів. Але не вирішеними залишилися питання формування узагальнюючих рекомендаційних параметрів для забезпечення гарантованої якості отримуваних напівфабрикатів високого ступеня готовності з урахуванням способу теплопідведення. Одне з рішень наведено в роботах [7, 8] та базується на концентруванні гранатового соку з початковим вмістом 13% сухих речовин при використанні омичного нагрівання. В результаті досліджень визначено вплив на коефіцієнт теплопередачі взаємозв'язку між нагріванням, витраченою енергією на процес уварювання природної сировини та площею поверхні



зрізання в умовах збільшення вмісту сухих речовин. Проте, поза увагою залишаються питання пов'язані з необхідністю стабілізації траєкторії руху хвилеподібної плівкової течії, після зрізання крайкою. Це пов'язано зі складністю апробації раціональної геометричної поверхні прижимної пластини в умовах використання гідродинамічного моделювання, а отже акцентує увагу на доцільності досліджень в цьому напрямі. Одне з практичних рішень наведено у роботі [9] при вдосконаленні роторного плівкового випарника зі зрізаючою лопаттю для концентрування рослинних поре. Але в роботі залишилися поза увагою шляхи підвищення ефективності процесу в умовах моделювання критеріального рівняння для визначення та прогнозування коефіцієнту тепловіддачі, зумовлюючи потребу подальших досліджень. Використання запропонованої зрізуючої лопаті з відбивальною поверхнею призводить до збільшення коефіцієнта тепловіддачі приблизно на 20% в порівнянні з базовою конструкцією прямокутної лопаті. Отримані розрахункові дані питомих витрат енергії нагрівання одиниці об'єму продукту в РПВ, становлять 408 кДж/кг, порівняно з базовим вакуум-випарним апаратом – 1019 кДж/кг, що характеризує зменшення витрат в 1,97 рази. При цьому тривалість термічної обробки в РПВ – 60 с, а в базовому ВВА 1 год, що показує суттєве зниження температурного впливу на сировину. Отримані дані свідчать про ефективність конструктивно-технічних рішень. Інженерно-технологічна складова будь-яких тепломасообмінних процесів, зокрема концентрування плодоягідної сировини, є основною під час виробництва харчових напівфабрикатів високого ступеня готовності.

Слід також враховувати ефективність використання способів виробництва рослинних пастоподібних напівфабрикатів високого ступеня готовності для подальшого використання у різноманітних продуктах харчування [10]. Так під час виробництва м'ясних кулінарних виробів в розробленій низькотемпературній установці, в м'ясний виріб додаються рослинні компоненти для підвищення харчової цінності та надання оригінальних смакових властивостей. Також проаналізовано процес передачі тепла неньютонівської псевдопластичної рідини всередині скребкового теплообмінника в умовах контактування стрижня із встановленими на ньому напівкруглими деталями, з внутрішньою поверхнею труби. Таким конструктивним рішенням автори досягали підвищення теплопередачі в умовах вимірювання перепаду тиску, теплопередачі та витраченої енергії при уварюванні неньютонівських рідин у статичних та динамічних умовах скребка для чотирьох областей течії. Отримані результати доводять можливість використання апарата в промисловості, навіть в умовах підвищеного споживання електроенергії для обертового руху скребка. Це пов'язано з тим, що нажалі у промисловості є потреба у забезпеченні досягнення перш за все технологічних потреб. Під час аналізу багатьох рідин Ейрінга-Пауелла у скребкових теплообмінниках зазначається, що харчовим продуктам притаманні неньютонівські властивості.

Авторами визначено гідродинамічну поведінку неньютонівських рідин в скребковому теплообміннику з використанням обертових скребкових лопатей, що дозволило отримати профілі швидкостей. Проте в роботі не наведені данні стосовно способу теплопідведення при концентрування та впливи впровадження у конструкцію плівкоутворюючого елемента (скребка) відбивальної поверхні для стабілізації гідродинамічної течії. Були визначені ізометричні поля хвилеподібної течії суспензії в умовах визначення вихрового потоку від лопатей з відсутності досліджень отримання рівномірності розподілу сировини після зрізання. Це може бути пов'язано зі складністю моделювання не врахованих вищезазначених параметрів, проте їх технічна реалізація дозволить підвищити коефіцієнт теплопідведення, особливо в умовах забезпечення обігріваної відбивальної поверхні зрізуючої лопаті. Тим самим обумовлюючи подальші дослідження в цьому напрямку.

У роботі [1] наведено гідродинамічну модель, яка враховує зміну чисел Рейнольдса та Нуссельта при концентруванні рослинної сировини для подальшого визначення коефіцієнту теплопередачі у скребковому теплообміннику. Проте в роботі не беруться до уваги геометрична форма плівкоутворюючих елементів, що значною мірою ускладнює подальшу апробацію отримуваних результатів. Одне з рішень наведено у роботі [10] шляхом моделювання гідродинамічної течії сировини базуючись на попередньо сформованих теоретично-літературних даних і подальшим доповненням експериментально отриманими. В результаті досліджень встановлено вплив на коефіцієнт теплопередачі властивостей сировини, конструктивних особливостей зрізуючою лопаті та властивостей нагрівальної поверхні, акцентуючи увагу на доцільності науково-практичних досліджень в цьому напрямку. Наявне технічне оснащення переробної промисловості багатьох країн реалізується на традиційному тепломасообмінному обладнанні: варильні котли, вакуум-випарні апарати, підігрівачі, роторні випарники тощо, яке в більшості випадках має низькі показники



ресурсоефективності [11]. Це пов'язано з високою енерго- та металоємністю за умов використання парових сорочок, різноманітних проміжних теплоносіїв тощо, а також складністю апаратурного вдосконалення. Також є складності з забезпеченням високих показників коефіцієнту теплопідведення з урахуванням геометричних властивостей плівкоутворюючих елементів, способів теплопідведення та стабілізації хвильової течії після зрізання. Отже, доцільним є проведення дослідження, присвяченого науково-практичному обґрунтуванню критеріальних рівнянь для визначення показника ефективного коефіцієнта тепловіддачі з урахуванням запропонованих робочих поверхонь випарника при використанні гріючих плівкоутворюючих елементів. Це, в свою чергу, забезпечить підвищення показників ресурсоефективності роторно-плівкових випарників в умовах раціонального концентрування харчової сировини при прогнозованому гідродинамічному перемішуванні в залежності від конструктивних особливостей лопатей. А отже, забезпечить високу якість отриманої продукції та конкурентоспроможність апаратурно-технологічного комплексу в цілому, доцільність досліджень в цьому напрямі.

### 3. Мета досліджень

Метою роботи є теоретично-практичне обґрунтування підбору критеріального рівняння із визначенням коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні роторно-плівкового випарника з гріючим плівкоутворюючим елементом до сировини, що обробляється для формування оптимальних геометричних параметрів робочої поверхні. Це забезпечить можливість ефективного визначення тепломасообмінних властивостей процесів концентрування в умовах підвищення коефіцієнту тепловіддачі.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання:

- удосконалити конструкцію плівкоутворюючого елементу роторно-плівкового випарника шляхом обігріву відбивальної поверхні за рахунок гнучкого плівкового резистивного електронагрівача випромінюючого типу;
- обґрунтувати критеріальне рівняння з визначення коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні роторно-плівкового випарника з гріючим плівкоутворюючим елементом до сировини.

### 4. Викладення основного матеріалу

При формуванні критеріального рівняння використовувалися традиційні критерії Нуссельта, Рейнольдса відцентрового, Прандтля. А також уточнюючі показники, що відповідають за теплообмін при гравітаційному стіканні плівки, її кипіння та геометричних властивостей плівкоутворюючого елементу з відбивальною поверхнею. Швидкість хвильової течії та отримувана товщина плівки визначали з рівняння Нуссельта, при цьому обробка експериментальних даних здійснювалась за допомогою пакету MathCat.

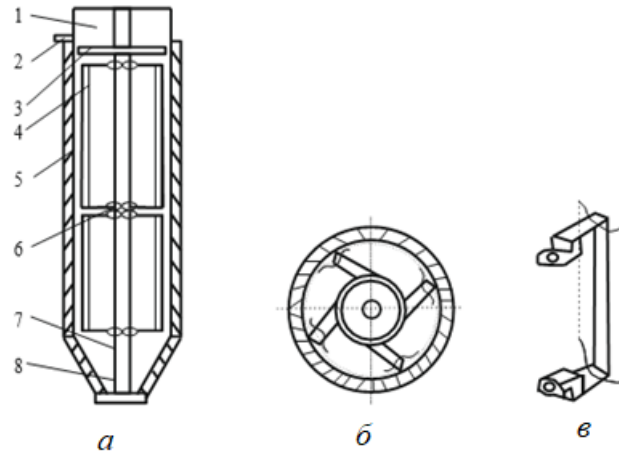
Якість проведення тепломасообмінних операцій, наприклад концентрування, підігрівання тощо з використанням роторно-плівкових випарників у більшості випадках залежить від способу теплопідведення, конструкції плівкоутворюючого елементу, стабілізації гідравлічної хвильової течії. Зокрема, стабілізація плівкоподібної течії на момент стікання та після зрізання крайкою плівкоутворюючого елементу впливає на кінцевий коефіцієнт тепловіддачі. Традиційні конструкції роторно-плівкових випарників характеризуються різноманітними геометричними конструкціями плівкоутворюючих елементів (шарнірні, прямокутні тощо), які забезпечують в певній мірі ефективні показники зрізання та перемішування дослідної сировини. Дані конструкції призначені для зрізання утвореної на робочій поверхні плівки, яка після зрізання частково зависає в робочому просторі апарату та вже потім потрапляє на гріючу поверхню за рахунок впливу відцентрової швидкості. Одним з рішень для стабілізації гідравлічного руху зрізаємої хвильової течії є впровадження відбивальної поверхні певної геометричної форми, яка дозволить примусово спрямовувати зрізану сировину на нагрівальну поверхню. Крім того, важливим фактором, окрім стабілізації хвильового руху є забезпечення підігрівання площі відбивальної поверхні для додаткового температурного ефекту в умовах перемішування часток сировини після зрізання.

Для реалізації науково-практичної апробації запропонованих інженерних рішень спрямованих на удосконалення конструкції плівкоутворюючого елементу роторно-плівкового випарника за рахунок обігріву відбивальної поверхні при використанні гнучкого плівкового резистивного електронагрівача випромінюючого типу (ГПРЕНВТ) [1, 9]. Схема експериментально-дослідної моделі роторно-плівкового випарника наведена на (рис. 1, а). Вдосконалена конструкція плівкоутворюючого елементу





з нагріваемою відбивальною поверхнею, наведена на (рис. 1, б), а схема стабілізації гідравлічного потоку представлена на (рис. 1, в).



**Рис. 1. Схема експериментально-дослідної моделі роторно-плівкового випарника:**

**а, б – поздовжній та поперечний перетини апарата; в – конструкція плівкоутворюючого елемента з нагріваемою відбивальною поверхнею; 1 – відділ сепарування паровмісного середовища; 2 – патрубок нагнітання дослідної сировини; 3 – розподільчий диск; 4 – вдосконалений плівкоутворюючий елемент з обігрівом відбивальною поверхнею; 5 – гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінювального типу (ГПРЕНВТ); 6 – шарнірні фіксатори плівкоутворюючого елемента; 7 – обертальний вал; 8 – відділ розвантаження апарата**

Моделна конструкція роторно-плівкового випарника працює наступним чином: дослідна пореподібна сировина нагнітається крізь патрубок 2 та надходить на розподільний диск призначений для формування плівки з подальшим її стіканням робочою поверхнею апарата. Обігрів якої здійснюється ГПРЕНВТ, який дозволяє ліквідувати парову сорочку традиційних роторно-плівкових апаратів, а отже підвищити ефективність процесу в цілому. Після формування плівки розподільчим диском 3 здійснюється її підхоплення вдосконаленими плівкоутворюючими елементами з обігрівом відбивальною поверхнею 4. Тим самим, забезпечуючи зрізання плівки плівкоутворюючим елементом та примусове спрямування на нагрівальну поверхню за рахунок геометричної форми відбивальної поверхні. А також за рахунок автономного обігрівання відбивальної поверхні на основі ГПРЕНВТ забезпечується температурна стабілізація сировини, що переміщується, після зрізання плівкоутворюючим елементом. Плівкоутворюючі елементи кріпляться на обертальному валу 7 за допомогою шарнірних фіксаторів 6. Автономність роботи ГПРЕНВТ відбивальної поверхні забезпечується за рахунок перетворення теплової енергії розміщеними в сепаруючому просторі елементами Пельтьє в низьковольтну напругу живлення, якої вистачає для нагрівання електричного нагрівача до 50°C. Після проходження робочого простору концентрована сировина надходить до відділу розвантаження та відводиться з апарату.

Для забезпечення якісного концентрування пореподібної рослинної сировини в роторно-плівкових випарниках з удосконаленим гріючим плівкоутворюючим елементом необхідно отримати критеріальне рівняння, яке враховуватиме вплив на сам перед узагальнених параметрів тепломасообміну. Зокрема коефіцієнт тепловіддачі визначається характером руху та залежністю початкових та отримуваних у процесі концентрування теплофізичних властивостей дослідної сировини. При цьому, конвективний теплообмін враховує кількісний параметр значення Прандтля ( $Pr$ ), модифікованого Рейнольдса ( $Re$ ) в умовах кипіння з утворення пухирців в залежності від поверхонь нагрівання та Грасгофа ( $Gr$ ) за вільної та вимушеної конвекції. А при врахуванні геометричних властивості удосконаленого плівкоутворюючого елемента, критеріальне рівняння матиме наступний узагальнений вигляд:

$$Nu = ARc^{n1} \cdot Gr^{n2} \cdot Re_{\text{кип}}^{n3} \cdot Pr^{n4}. \quad (1)$$

Враховуючі вертикальне розміщення робочої камери апарату в умовах гравітаційного плівкоподібного руху дослідної сировини, зокрема стікання та відцентрового переміщення за рахунок крайки та відбивальної пластини лопаті в умовах пароутворення. Обумовлює використання трьох числових параметрів Рейнольдса, за умов врахування трьох швидкостей руху сировини: осьової,



окружної та кипіння, а також відцентрового критерія Грасгофа. При цьому гравітаційним критерієм Грасгофа можна знехтувати, оскільки плівкову течію ускладнює термічна конвекція, отже відцентрове число Грасгофа матиме наступний вигляд:

$$Gr_c = \beta \omega^2 \cdot Rl^3 \cdot \Delta T / v^2. \quad (2)$$

При зрізанні рухливої плівкоподібної течії сировини крайкою лопаті формується хвильовий характер поверхні, що зрізається та значною мірою впливає на характер гідравлічного руху плівки. Під час апробації використовували вихідні данні дослідної сировини та модельної конструкції роторно-плівкового випарника з наступними параметрами: діаметр –  $D = 0,035$  м; витрата сировини –  $G = 1,4 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Питома теплота пароутворення  $r = 2,35 \cdot 10^6$  Дж/кг, густина теплового потоку –  $q = 1,44 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> і дослідної сировини –  $\rho = 1200$  Па·с, число Прандтля –  $Pr = 1,84 \cdot 10^4$  та частота обертання ротора  $n = 1,16$  с<sup>-1</sup>.

Щільність зрошення робочої поверхні роторно-плівкового визначатиметься рівнянням:

$$Gr = G/\pi D = 1,4 \cdot 10^{-3} / 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} = 1,27 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с} \cdot \text{м}. \quad (3)$$

Число Рейнольдса для осьової швидкості досліджуваної рідини в роторному плівковому випарнику характеризується рівнянням:

$$Re = Gr/\eta = 1,27 \cdot 10^{-2} / 2,5 = 5,1 \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Отриманий числовий параметр числа Рейнольдса дозволяє використовувати розрахункові результати Нуссельта для розв'язання завдання в умовах гравітаційного стікання плівкоподібної течії нехтуючи силами інерції, отже товщина плівки за Нуссельтом, розраховуватиметься наступним чином:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3Gr\eta}{\rho^2 g}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,27 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5}{1,2^2 \cdot 10^6 \cdot 9,81}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (5)$$

Отже швидкість вертикального стікання плівкоподібної сировини у роторно-плівковому випарнику визначатиметься наступним рівнянням:

$$v_{пл} = \frac{Gr}{\rho \delta} = \frac{1,27 \cdot 10^{-2}}{1,2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-3}} = 5,57 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}. \quad (6)$$

Критеріальне рівняння Рейнольдса за спіральною траєкторією руху (обертовою) швидкість з врахуванням, що  $v_{об} = \pi D n = 3,14 \cdot 0,035 \cdot 1,16 = 0,127$  м/с, тоді буде описуватися рівнянням:

$$Re_c = \rho v \delta / \eta = 1,2 \cdot 0,127 \cdot 1,9 \cdot 10^{-3} / 2,5 = 0,115. \quad (7)$$

Для розрахунку значень випареної вологи з дослідної сировини, а саме густини пари, коефіцієнту об'ємного розширення та поверхневого натягу перетворюємо величини води в стані насичення при 100°C:  $\rho_n = 5,97 \cdot 10^{-1}$  кг/м<sup>3</sup>;  $\beta = 7,15 \cdot 10^{-4}$  1/К та  $\sigma = 5,89 \cdot 10^{-2}$  Н/м.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho - \rho_n)}} = \sqrt{\frac{5,89 \cdot 10^{-2}}{9,81 \cdot (1,2 \cdot 10^3 - 5,97 \cdot 10^{-1})}} = 2,238 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (8)$$

$$v_{кип} = \frac{q}{r \cdot \rho_n} = \frac{1,44 \cdot 10^4}{2,35 \cdot 10^6 \cdot 5,97 \cdot 10^{-1}} = 10,26 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}. \quad (9)$$

$$Gr_c = \frac{\beta \omega^2 \cdot Rl^3 \cdot \Delta T}{v^2} = \frac{7,15 \cdot 10^{-4} (2 \cdot 3,14 \cdot 1,16)^2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} (1,88 \cdot 10^{-3}) \cdot 5}{(2,5/1200)} = 0,67 \cdot 10^{-4}. \quad (10)$$

При цьому показники товщини та швидкості ( $\delta_k, v_k$ ) співрозмірні з  $\delta = 1,88 \cdot 10^{-3}$  м і  $v_{пл} = 5,58 \cdot 10^{-3}$  м/с, отже отримані рівняння характеризуються властивостями шару сировини у вигляді лінійного розміру процесу кипіння.

Показник  $v_k$  характеризує та зазначає про рівномірність дії впливу на теплообмін процесу кипіння та гравітаційного руху дослідної сировини. При цьому висока в'язкість сировини призводить до мінімального числа Грасгофа, а отже вираз:  $GrPr$  характеризується значенням відсутності впливу вільної конвекції на тепловіддачу. Тим самим, дозволяючи нехтувати ним при розв'язання рівнянь подібності.

Геометричний критерій, що відповідає за геометричну область конвективного теплообміну дозволяє враховувати вплив плівкоутворюючого елементу на гідродинаміку плівкової течії. А отже, його доцільно визначати з врахуванням довжини кромки елемента лопаті та відбивальної обігріваної пластини ( $c$ ) до довжини кола робочої камери  $\pi D$  з урахуванням кількості плівкоутворюючих елементів  $z$ . Також необхідно враховувати відносну висоту  $h/\delta$  для обліку кута скосу лопаті та величину занурення її в дослідну сировину, а отже критерій матиме наступний вигляд:

$$P_G = \frac{c \cdot z}{\pi \cdot D} = \frac{h}{\delta}. \quad (11)$$



При цьому, розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні до сировини в роторно-плівковому випарнику з обігрівальними плівкоутворюючими елементами зводиться до аналізу фізичних процесів, а отже може бути рекомендоване наступне критеріальне рівняння:

$$Nu = ARe_c^{n_1} \cdot Pr_r^{n_2} \cdot \left(\frac{v_{\text{кип}}}{v}\right)^{n_3} \cdot \left(\frac{v_{\text{пл}}}{v}\right)^{n_4} \cdot P_G^{n_5}. \quad (12)$$

Математична обробка критеріального рівняння з врахуванням попередньо обраних експериментальних даних в пакеті MathCat, підтверджує, що отриманий критерій є статистично значимим. Отже, отримане критеріальне рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні роторно-плівкового випарника та удосконаленого плівкоутворюючого елемента до дослідної сировини (купажоване плодово-ягідне пюре), матиме наступний вигляд:

$$Nu = 5,842 \cdot Re_c^{0,051} \cdot Pr_r^{0,246} \cdot \left(\frac{v_{\text{кип}}}{v}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{v_{\text{пл}}}{v}\right)^{0,273} \cdot P_G^{0,0481}. \quad (13)$$

Відносна похибка отриманого критеріального рівняння становить 0,95%, а рівняння 13, достовірне в наступних межах науково-практичного апробаційного використання:  $Re_c \cdot 10^3 = 85,2 \dots 120,2$ ;  $v_{\text{пл}} \cdot 10^3 = 3,050 \dots 5,295$ ;  $v_{\text{пл}} \cdot 10^3 = 4,340 \dots 12,120$ .

Для підтвердження ефективності запропонованих інженерно-конструкторських рішень стосовно доцільності використання в роторно-плівкових випарниках плівкоутворюючого елемента з відбивальною поверхнею, яка обігривається ГПРЕНВТ здійснено порівняльно-розрахунковий аналіз основних дослідних параметрів з традиційним вакуум-випарним апаратом (табл. 1).

Таблиця 1.

**Характеристики ротаційного плівкового апарату в порівнянні з вакуумним випарним апаратом**

Індикатор	Вакуумний випарний апарат (МЗС-320)	Роторно-плівковий апарат (РПА)
Вага апарату	$m^* = 1520$ кг	$m = 43$ кг
Для розігріву та відварювання продукту	$Q_{\text{пр}} = mc(t_k - t_n) + r m_{\text{конд}} =$ $= 1500 \cdot 3,7 \cdot (65 - 50) + 2350 \cdot 600 =$ $= 1493250$ кДж	$Q_{\text{пр}} = Gc(t_k - t_n) + r G_{\text{конд}} =$ $= 3700 \cdot 0,028 \cdot (65 - 50) +$ $+ 2350 \cdot 10^3 \cdot 0,0052 = 13540$ Дж/с
Поверхня теплообміну	$3,7$ м <sup>2</sup>	$0,75$ м <sup>2</sup>
Тривалість обробки	$T_{\text{ВВА}} = Q/F \cdot k \cdot \Delta t = 1510530 / 3,7 \cdot$ $1454 \cdot 78 = 3600$ с	$T_{\text{РПВ}} = L_{\text{ал}} / v_{\text{пл}} = 1,2 / 0,005 =$ $= 200$ с
Питома металоємність	$M = m^* / F^* = 1,520 / 3,7 =$ $= 410$ кг/м <sup>2</sup>	$M = m / F =$ $= 43 / 0,75 = 57$ кг/м <sup>2</sup>

Примітка\* – порівняльні дані базової конструкції МВС-320, взяті з довідникової літератури

Тепловий розрахунок удосконаленого роторного плівкового випарника проводили з використанням обґрунтованого рівняння (13). Визначені в результаті розрахунку данні цілком відповідають граничним умовам в межах науково-практичного апробаційного використання. Вихідними даними для розрахунку роторно-плівкового випарника є продуктивність – 100 кг/год, діаметр корпусу апарату – 0,2 м.

Питома металоємність в РПА з плівкоутворюючим елементом, що має відбивальну поверхню, складає 57 кг/м<sup>2</sup>, порівняно з традиційними вакуум-випарними апаратами консервних виробництв (410 кг/м<sup>2</sup>) що у 7,1 раз менше. При цьому також значно зменшується тривалість температурного впливу на сировину: роторний плівковий випарник – 200 с та 3600 с у традиційному ВВА.

Експериментально-практичні дослідження підтверджують ефективність використання вдосконаленого роторно-плівкового випарника з запропонованим плівкоутворюючим елементом, який має відбивальну поверхню, що обігривається (рис. 1). Запропоноване конструктивне рішення спрямоване на стабілізацію гідравлічного руху хвильової течії, що зрізається за рахунок відбивальної поверхні певної геометричної форми, яка дозволить примусово спрямовувати зрізану сировину на нагрівальну поверхню (рис. 1, б, в). А за рахунок автономного підігріву в площі відбивальної поверхні реалізується додатковий температурний ефект в умовах переміщення часток сировини після зрізання.

Сформовано узагальнене критеріальне рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі роторно-плівкового випарника з запропонованим плівкоутворюючим елементом із відбивальною обігриваємою поверхнею для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні до сировини



(13). Практичне використання запропонованих рішень за рахунок додаткового автономного обігріву відбивальної поверхні ГПРЕНВТ та з урахуванням цього параметру у критеріальному рівнянні забезпечує збільшення поверхні теплообміну РПА до  $0,75 \text{ м}^2$  (табл. 1). При цьому питома металоємність в роторно-плівковому випарнику з плівкоутворюючим елементом, що має відбивальну поверхню становить  $57 \text{ кг/м}^2$ . Це менше у 7,1 раз порівняно з традиційним вакуум-випарним апаратом  $410 \text{ кг/м}^2$  (табл. 1). Також зменшує тривалість температурного впливу на сировину: роторно-плівковий випарник – 200 с та 3600 с у традиційному ВВА (табл. 1). Тим самим забезпечуючи відмінність запропонованих інженерно-конструкторських рішень від аналогів в яких концентрування реалізується з використанням проміжних теплоносіїв зі штучним зменшенням ефективності процесу в цілому [13].

Одним з обмежень при концентруванні органічних пюре, молочної продукції тощо є стабілізація температури робочої поверхні в залежності від питомого навантаження апарата, що потребує використання регулювання об'єму сировини, що надходить на уварювання. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на визначення впливу швидкості обертів удосконаленого плівкоутворюючого елемента на гідродинамічну та тепломасообмінну моделі концентрування різноманітних харчових речовин.

## 5. Висновок

Удосконалено модель роторно-плівкового випарника з запропонованим плівкоутворюючим елементом, який має відбивальну поверхню, що обігривається. Таке рішення запропоновано для стабілізації гідравлічного руху зрізаємої хвильової течії за рахунок відбивальної поверхні певної геометричної форми, яка дозволить примусово спрямовувати зрізану сировину на нагрівальну поверхню. Крім того, важливим фактором, окрім стабілізації хвильового руху є забезпечення підігрівання площі відбивальної поверхні для додаткового температурного ефекту в умовах переміщення часток сировини після зрізання.

У результаті аналізу експериментально-теоретичних параметрів процесу теплообміну обґрунтовано критеріальне рівняння коефіцієнта тепловіддачі роторно-плівкового випарника з запропонованим плівкоутворюючим елементом, який має відбивальну обігриваєму поверхню для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від робочої поверхні до сировини. Здійснено розрахунок роторного плівкового випарника з використанням критеріального рівняння та отримано корисну поверхню теплообміну РПА –  $0,75 \text{ м}^2$ . Встановлено, що питома металоємність в роторно-плівковому випарнику з плівкоутворюючим елементом, що має відбивальну поверхню становить  $57 \text{ кг/м}^2$ , порівняно з традиційним вакуум-випарним апаратом  $410 \text{ кг/м}^2$  що у 7,1 раз менше. При цьому також значно зменшується тривалість температурного впливу на сировину.

## Список використаних джерел

1. Zahorulko A., Zagorulko A., Cherevko O., Dromenko O., Solomon A., Yakobchuk R, Bondarenko O., Nozdrina N. Determination of the heat transfer coefficient of a rotary film evaporator with a heating filmforming element. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*. 2021. Vol. 6 №. 8 (114). P. 41–46.
2. Cherevko O., Mykhaylov V., Zagorulko A., Zahorulko A. Improvement of a rotor film device for the production of high-quality multicomponent natural pastes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 2 (11 (92)). P. 11–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126400>.
3. Polyevoda Y. A., Hurych A. J., Kutsyy V. M. Patterns of changing settings of the temperature field at vapour-contacting heating by sterilizing products in cylindrical containers. *ИНМАТЕН*. 2016. 50 (3). P. 65–72.
4. Паламарчук І. П., Янович В. П., Полевода Ю. А., Брянський В. В. Аналіз математичної моделі вібровідцентрового змішувача для виготовлення сухих молочних сумішей. *Збірник наукових праць вінницького державного аграрного університету, серія технічні науки*. 2010. № 4. С. 5–12.
5. Цуркан О. В., Гурич А. Ю., Полевода Ю. А. Обґрунтування технологічної та конструктивної схеми автоклава з аеродинамічним інтенсифікатором. *Наукові праці ОНАХТ, серія технічні науки*. 2014. Випуск 46 Том 2. С. 312–314.
6. Паламарчук І. П., Полевода Ю. А., Куций В. М. Математичне моделювання процесу тепло масообміну за умов пароконтактної стерилізації продукції у циліндричній тарі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 2 (97). С. 64–70.
7. Соломон А. М., Бондар М. М., Новгородська Н. В. Перспективні напрямки виробництва кисломолочних ферментованих продуктів з синбіотичними властивостями. *Продовольчі ресурси*. 2021. Том. 9 № 17. С. 22–33.





8. Соломон А. М., Полевода Ю. А. Обґрунтування складу ферментованих продуктів з використанням рослинних наповнювачів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 3 (110). С. 126–134.
9. Zahorulko A., Zagorulko A., Yancheva M., Ponomarenko N., Tesliuk H., Silchenko E. et. al. Increasing the efficiency of heat and mass exchange in an improved rotary film evaporator for concentration of fruit-and-berry puree. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6 (8 (108)). P. 32–38.
10. Mykhailov V., Zahorulko A., Zagorulko A., Liashenko B., Dudnyk S. Method for producing fruit paste using innovative equipment. *Acta Innovations*. 2021. 39. P. 15–21.
11. Cherevko O., Mikhaylov V., Zahorulko A., Zagorulko A., Gordienko I. Development of a thermal-radiation single-drum roll dryer for concentrated food stuff. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1 (11 (109)). P. 25–32.
12. Гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінюючого типу : пат. 108041 Україна : МПК H05B 3/36, B01D 1/22, G05D 23/19. № у 201600827 ; заявл. 02.20.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.
13. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2019. 1. С. 75–85.

### References

- [1] Zahorulko, A., Zagorulko, A., Cherevko, O., Dromenko, O., Solomon, A., Yakobchuk, R., Bondarenko, O., Nozdrina, N. (2021). Determination of the heat transfer coefficient of a rotary film evaporator with a heating filmforming element. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*, 6 (8 (114)), 41–46. Harkiv [in English].
- [2] Cherevko, O., Mykhaylov, V., Zagorulko, A., Zahorulko, A. (2018). Improvement of a rotor film device for the production of high-quality multicomponent natural pastes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (92)), 11–17. Harkiv [in English].
- [3] Polyevoda, Y. A., Hurych, A. J., Kutsyy, V. M. (2016). Patterns of changing settings of the temperature field at vapour-contacting heating by sterilizing products in cylindrical containers. *INMATEH*, 50 (3), 65–72. [in English].
- [4] Palamarchuk, I. P., Yanovych, V. P., Polievoda, Yu. A., Brianskyi, V. V. (2010). Analiz matematychnoi modeli vibrovidtsentrovoho zmishuvacha dlia vyhotovlennia sukhykh molochnykh sumishei. [Analysis of a mathematical model of a vibrocentric mixer for the manufacture of dry milk formulas]. *Zbirnyk naukovykh prats vinnyskoho derzhavnogo ahrarnoho universytetu, seriia tekhnichni nauky*, 4, 5–12. Vinnytsia [in Ukrainian].
- [5] Tsurkan, O. V., Hurych, A. Y., Polievoda, Y. A. (2014). Obhruntuvannia tekhnolohichnoi ta konstruktyvnoi skhemy avtoklava z aerodynamichnym intensyfikatorom. [Substantiation of technological and constructive scheme of autoclave with aerodynamic intensifier]. *Naukovi pratsi ONAKhT, seriia tekhnichni nauky*, 46, 2. 312–314. [in Ukrainian].
- [6] Palamarchuk, I. P., Polievoda, Yu. A., Kutsyi, V. M. (2017). Matematyчне modeliuвання protsesu teplo masoobminu za umov parokontaktnoi sterylizatsii produktsii u tsylindrychnii tari. [Mathematical modeling of the process of heat and mass transfer under the conditions of steam contact sterilization of products in a cylindrical container]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 2 (97), 64–70. Vinnytsia [in Ukrainian].
- [7] Solomon, A. M., Bondar, M. M., Novhorodska, N. V. (2021). Perspektyvni napriamky vyrobnytstva kyslomolochnykh fermentovanykh produktiv z synbiotychnymy vlastyvoistyamy. [Promising directions of production of fermented milk fermented products with synbiotic properties]. *Prodovolchi resursy*, 9 (17), 22–33. [in Ukrainian].
- [8] Solomon, A. M., Polievoda, Yu. A. (2020). Obhruntuvannia skladu fermentovanykh produktiv z vykorystanniam roslynnykh napovniuvachiv. [Substantiation of the composition of fermented products using vegetable fillers]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 3 (110), 126–134. Vinnytsia [in Ukrainian].
- [9] Zahorulko, A., Zagorulko, A., Yancheva, M., Ponomarenko, N., Tesliuk, H., Silchenko, E. et. al. (2020). Increasing the efficiency of heat and mass exchange in an improved rotary film evaporator for concentration of fruit-and-berry puree. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (108)), 32–38. Harkiv [in English].
- [10] Mykhailov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Liashenko, B., Dudnyk, S. (2021). Method for producing fruit paste using innovative equipment. *Acta Innovations*, 39, 15–21. [in English].
- [11] Cherevko, O., Mikhaylov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Gordienko, I. (2021). Development of a thermal-radiation single-drum roll dryer for concentrated food stuff. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (11 (109)), 25–32. Harkiv [in English].



- [12] Hnuchkyi plivkovyi rezystyvnyi elektronahrivach vyprominiuiuchoho typu [Flexible film resistive electric heater of radiating type]: pat. 108041 Ukraina : MPK H05B 3/36, B01D 1/22, G05D 23/19. № u 201600827 ; zaiavl. 02.20.2016; opubl. 24.06.2016, Biul. № 12. [in Ukrainian].
- [13] Cherevko, O. I., Maiak, O. A., Kostenko, S. M., Sardarov, A. M. (2019). Eksperymentalne ta imitatsiine doslidzhennia teploobminu pid chas uvariuvannia ovochevoho soku. [Experimental and simulation study of heat transfer during vegetable juice boiling]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli, 1*, 75–85. [in Ukrainian].

#### DETERMINATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF A ROTARY EVAPORATOR WITH HEATING FILM-FORMING ELEMENT

*In the article, a model of a rotary-film evaporator with a film-forming element, which has a heated reflective surface, was investigated. Such a solution was proposed to stabilize the hydraulic movement of the cut off wave flow due to the reflective surface of a certain geometric shape for the forced direction of the cut raw material to the heating surface. Autonomous heating of the reflecting surface additionally provides a temperature effect in the conditions of movement of raw material particles after cutting.*

*As a result of the analysis of the experimental and theoretical parameters of heat transfer, the criterion equation for the heat transfer coefficient of the evaporator with the proposed film-forming element, which has a reflective heated surface for calculating the heat transfer coefficient from the working surface to the raw material, is substantiated. The resulting equation takes into account the influence of the vertical component of the motion of the raw material film, the centrifugal movement during the rotation of the film-forming element, the mixing of the boiling film of the raw material with steam bubbles, the geometric characteristics of the film-forming blade on the hydrodynamic flow of the raw material.*

*Calculation of a rotary-film evaporator using a criterion equation and a useful heat exchange surface of 0,75 m<sup>2</sup> was obtained. The specific metal content in a rotary-film evaporator with a film-forming element having a reflective surface is 57 kg/m<sup>2</sup> compared to the vacuum evaporator traditionally used in canning industries 410 kg/m<sup>2</sup>, which is 7,1 times less. Also, the duration of the temperature effect on the raw material is reduced: a rotary-film evaporator - 200 s and 3600 s in a traditional apparatus. The obtained data will be useful for designing rotary-film apparatuses of various geometrical parameters using hinged blades with a reflective plate.*

**Key words:** heat transfer coefficient, rotary-film evaporator, criterion equation, film-forming element, organic raw materials, technological re-equipment.

**F. 13. Fig. 1. Tabl. 1. Ref. 13.**

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Полєвода Юрій Алікович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

**Соломон Алла Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та мікробіології Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: Soloalla78@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2982-302X>).

**Підлипна Марина Петрівна** – аспірант кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: petrovnamarina940@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1317-2018X>).

**Yurii Polievoda** – Ph.D., Associate Professor of the Department of technological processes and equipment for processing and food production, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

**Alla Solomon** – Ph.D., Associate Professor of the Department of food technology and microbiology of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: Soloalla78@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2982-302X>).

**Maryna Pidlypna** – postgraduate student of the Department Technological processes and the possession of food processing and food production of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: petrovnamarina940@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1317-2018X>).