

УДК 664.8.036.001.76

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.202501

Удосконалення скребкового теплообмінника попереднього підігрівання рослинної сировини перед концентруванням

К. Р. Касабова, С. М. Сабадаш, В. Ф. Могутова, В. О. Волох, А. М. Поляков, Т. А. Лазарєва, О. С. Благий, О. В. Радчук, В. В. Лаврук

На підприємствах харчових виробництв під час підігрівання рідких та пасто-подібних продуктів широким попитом користуються скребкові теплообмінники, які завдяки високій інтенсивності термообробки дозволяють зберігати початкові властивості сировини, що переробляється. Більшість теплообмінників мають нестабільну стабілізуючу дією: тиск пари – температура, що призводить до псування сировини, в умовах значної енерго- та металоємності. Усунення цих недоліків можливо при використанні в якості нагрівача в вдосконаленому скребковому теплообміннику температуро-стабільного гнучкого плівкового резистивного електронагрівача випромінювального типу. В якості перемішуючого органу теплообмінника запропоновано використовувати шарнірну лопать зі зрізаючої крайкою (з відбивальною гріючою поверхнею) для отримання рівномірного розподілу товщини шару продукту на робочій поверхні й додаткового її підігрівання відбивальною поверхнею лопаті. Теплообмінник має можливість встановлення охолоджуючої оболонки з кільцевими каналами для проходження холодоагенту, яку розміщено на зовнішній поверхні безтермоізоляційного гнучкого електронагрівача. Таке рішення забезпечує можливість охолодження до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ та одночасно виступає в якості додаткової повітряної теплоізоляції при відсутності носія в ній.

Визначено рівномірність розподілу теплового потоку на нагрівальній поверхні модельної конструкції вдосконаленого апарата ($60,3\text{...}60,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) та на відбивальній поверхні шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою ($60,0\text{...}60,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Встановлено сумарну товщину шару рідини в залежності від частоти обертання валу запропонованої шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою, яка складає: при 50 хв^{-1} – 2,65 мм, при 350 хв^{-1} – 1,5 мм, в порівнянні зі стандартною шарнірною лопаттю (товщина шару від 5,0 мм до 1,5 мм) за витратою продукту $W=50\text{ л/год}$. Удосконалений скребковий теплообмінник характеризується зменшенням в 1,48 раз питомих витрат енергії (170,4 кДж/кг), затрачуваної на нагрівання одиниці об'єму продукту в порівнянні з підігрівачем з паровою оболонкою – 252,6 кДж/кг. В результаті досліджень підтверджено ефективність використання удосконаленого скребкового теплообмінника та запропоновано його конструкційна схема

Ключові слова: підігрівання, скребковий теплообмінник, зрізаюча лопать, тепlopідведення, гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінювального типу

1. Вступ

В багатьох країнах світу розвиток здорового функціонального харчування є одним із головних напрямків науково-практичних досліджень харчової індустрії

рії, для забезпечення сьогоденних потреб споживачів. Раціональне використання природної сировини забезпечує різноманітність асортименту функціонального харчування, зокрема й для немовлят [1]. Саме, якість дитячого харчування забезпечує розвиток та становлення здоров'я нації. Використання природної сировини для виробництва функціональних виробів обумовлює обґрунтовані підходи до способів її переробки з врахуванням початкових, поетапних та кінцевих властивостей [2]. В тому числі під час виробництва: соків, джемів, концентрованих паст, сушених виробів та порошків з подальшим використанням їх в ролі природних напівфабрикатів високого ступеня готовності [3, 4]. Зокрема спостерігається розповсюджена тенденція з внесення до рецептурного складу різноманітних кондитерських та хлібобулочних виробів природних напівфабрикатів для збагачення харчовою та біологічною цінності [5, 6].

Теплофізичні властивості рослинної сировини значною мірою впливають на якість проведення тепломасообмінних операцій, в тому числі при: підігріванні, пастеризації, витримуванні тощо. До найбільш впливових властивостей сировини можна віднести: в'язкість, кристалізацію, фазові перетворення (при екстрагуванні), наявність більш менш неоднорідної структури, а також тягучість [7]. При цьому більшість теплообмінного обладнання є морально застарілим та низько ресурсоефективним, зокрема й широко використовувані скребкові теплообмінники. Більшість з них мають складність чіткої стабілізації між тиском пари в оболонках та кінцевою температурою сировини, що обробляється без її пригорання, а отже й псування. Вирішення цих питань потребує детальних науково-практичних досліджень способів вдосконалення обладнання для попереднього підігрівання рослинної сировини при максимальному збереженні її початкових властивостей.

Одним з напрямків вирішення поставлених питань є визначення та забезпечення стабілізації температурних параметрів попереднього підігрівання сировини перед концентруванням в удосконаленому теплообміннику під час виробництва якісних виробів природного походження.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Розширення асортименту конкурентноспроможних виробів з рослинної сировини залежить від проведення технологічних операцій на базі ресурсоефективного обладнання та забезпеченні якісних властивостей [4]. Так, у роботі [8] підкреслюється важливість проведення тепломасообмінних процесів в умовах попередньої обробки рослинної сировини, що є важливим фактором впливу на кінцеву якість отримуваної продукції. Підвищення якості продукції потребує постійної розробки та вдосконалення узагальненої матриці для створення інноваційного технологічного обладнання з чітко стабілізованими щадними тепломасообмінними властивостями, врахуванням різноманітних фізіологічних властивостей сировини та кінцеву ціль їх застосування [9, 10].

У роботі [11] представлена вдосконалена конструкція вакуум-випарного апарата для виробництва високоякісних плодоовочевих пастоподібних напівфабрикатів. Перевагою апарата є заміна парової складової обігрівання з ліквідацією металоемних трубопроводів на чітко стабілізоване електричне нагріван-

ня. Реалізований нагрівач ГПРЕНВТ (гнучкий плівковий резистивний електро-нагрівач випромінювального типу) [12], який дозволяє одночасно збільшити поверхню теплообміну за рахунок обігріву ним мішалки. У роботі [13] зазначається ефективність ліквідації гріючої оболонки з турбулізованим теплоносієм на електричний обігрів робочої камери роторного плівкового апарату, забезпечуючи, тим самим зменшення металоемності апарату. Подальші дослідження, наведені у роботі [14], підкреслюють ефективність вдосконалення обігріву апарату з забезпеченням прийнятних теплових режимів для виробництва високоякісних багатокомпонентних природних паст з максимальним збереженням привабливих кольорових властивостей. При цьому частково залишаються невирішеними питання стосовно рівномірності розподілу шару сировини при перемішуванні під час тепломасообмінної обробки та можливість використання вищезазначеного обладнання в єдиному апаратурно-технологічному комплексі для досягнення ресурсоефективності в цілому.

У роботах [15, 16] представлені результати з розробки енергоефективної ІЧ-сушарки та впливу застосованих в неї щадних режимів ІЧ-сушіння на колір сушених купажованих порошків на основі паст на всіх стадіях виробництва.

Використання барабанних сушарок характеризується складністю контролю зміни маси сировини в залежності від теплопідведення, що суттєво впливає на ефективність та якість процесу [17]. Тому виникає потреба в оновленні та пошуку новітніх шляхів з реалізації тонкоплівкового сушіння сировини з врахуванням впливу всього технологічного процесу. При цьому в роботах [15–17] повною мірою не розкриті питання з доцільності проведення попередніх операцій та обґрунтованих впливів теплових режимів на отримувану якість, обумовлених особливістю початкових властивостей сировини, що обробляється. А також повною мірою не враховано використання сучасного тепломасообмінного обладнання для виробництва якісних функціональних виробів [18].

Розповсюджені теплообмінні апарати для обробки високов'язких харчових речовин у більшості випадках характеризуються тривалістю технологічних процесів, що обумовлює доцільність розробки та впровадження загально зрозумілих механізмів з оптимізації тепломасообмінних процесів в цілому [19, 20]. У роботі [21] наведені дослідження теплопередачі ньютонівських рідин в скребокному теплообміннику в залежності від швидкості руху та властивостей. При цьому здійснюються подальші дослідження в напрямі підвищення теплопередачі в залежності від конструкції зрізаючої лопаті та областей течії. Також у роботі [22] наведено профілі швидкостей для різних областей течії, швидкостей та функцій потоку, сил, діючих на поверхню та лопаті, залишаючи поза увагою визначення оптимальних витрат енергії.

Таке рішення ускладнює процес моделювання та обґрунтування оптимальних геометричних розмірів апарату з врахуванням структурних властивостей сировини, потребує подальших досліджень в цьому напрямі в умовах забезпечення рівномірного розподілу сировини. Так, у роботі [23] наведено ізометричні поля руху суспензії з встановленням вихрового потоку від лопатей з відсутністю результатів досліджень з забезпечення рівномірності розподілу сировини від швидкостей обертання.

У роботі [24] розглянуто модель гідродинамічного процесу та теплопередачі у скребковому теплообміннику з врахуванням дії різноманітних сил, що ґрунтуються на результатах отриманих меж змін чисел Рейнольдса та Нуссельта. У роботі [25] наводиться гідродинамічна модель руху сировини з врахуванням альтернативних даних (теоретично-літературних) та експериментальних, тим самим підкреслюючи значний вплив на гідродинамічну модель швидкості потоку рідини, властивостей нагрівальної поверхні та структури сировини [26]. Це в свою чергу дозволяє підтвердити важливість досліджень гідродинамічних моделей у вдосконалених скребкових теплообмінниках для обґрунтованого встановлення раціональних тепломасообмінних параметрів та частоти обертання лопатей в умовах забезпечення рівномірності розподілу сировини.

На сьогодні на невеликих підприємствах з переробки рослинної сировини для реалізації процесів підігрівання використовують варильні котли, підігрівачі тощо. Тому під час порівняння ефективності процесу підігрівання було обрано найбільш поширений при переробці рослинної сировини вакуум-випарний апарат періодичної дії призначений для уварювання та підігрівання з одночасним перемішування. Більшість використовуваного консервними виробництвами обладнання характеризується високою енерго- та металоємністю за рахунок використання проміжних теплоносіїв, мереж трубопроводів та теплогенеруючих пристроїв, знижуючи тим самим ресурсоефективність виробничого комплексу. Такий спосіб теплопідведення має складність стабілізації теплових потоків, призводячи до перегрівання певного об'єму сировини, що обробляється. Також виникають ускладнення з забезпечення рівномірності розподілу шару сировини по всій поверхні апарата, без врахування конструктивних особливостей перемішувальних пристроїв та структури сировини, порушуючи рівномірність її нагрівання та знижує отримувану якість. Отже подальші дослідження повинні спрямовуватися на ресурсозбереження в процесу попереднього підігрівання в скребковому теплообміннику при забезпеченні рівномірності нагрівання робочих поверхонь, що обігриваються ГПРЕНВТ. При цьому важливим є забезпечення рівномірності розподілу шару сировини в умовах перемішування в залежності від конструктивних особливостей лопатей.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є вдосконалення скребкового теплообмінника (СТ) для попереднього підігрівання рослинної сировини перед концентруванням на основі встановлення рівномірності розподілу температури та шару сировини.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити температурне поле в умовах зміненого способу теплопідведення та рівномірність шару сировини від шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою на робочій поверхні модельної конструкції скребкового теплообмінника;
- визначити можливість підвищення ефективності скребкового теплообмінника за рахунок вдосконалення способу теплопідведення та конструкції шарнірної лопаті;
- запропонувати вдосконалену конструкцію скребкового теплообмінника.

4. Матеріали, методи дослідження попереднього підігрівання рослинної сировини та експериментальна установка

Реалізацію конструктивно-технологічних завдань мети роботи здійснювали на базі Науково-дослідного центру «Новітні біотехнології та обладнання для виробництва харчової продукції з високими оздоровчими властивостями» Харківського державного університету харчування та торгівлі (Україна). З застосуванням вдосконаленої моделі скребкового теплообмінника, де обігрів робочого об'єму здійснювався ГПРЕНВТ [12] при цьому в якості порівняльної конструкції використовувався підігрівач періодичної дії.

Під час експериментально-розрахункових досліджень модельної конструкції скребкового теплообмінника (СТ) зазначено його детальний опис, методи дослідження попереднього підігрівання рослинної сировини. На прикладі суміші пюре в складі: яблуко – 60 %; абрикос – 30 %; кизил – 10 % зі вмістом сухих речовин, СР – 11 %). Підігрівання сировини здійснювалось до температури 65 °С в умовах змінної частоти обертання валу в діапазоні 25...350 хв⁻¹ при застосуванні різних конструкцій шарнірних лопатей. Визначення зміни товщини шару сировини на робочій поверхні здійснювалось безконтактним методом за допомогою частотоміру ЧЗ-57А (Україна). Автоматичний контроль температурного поля та вимірювання в реальному часі здійснювався вимірювальним пристроєм фірми «ОВЕН» (Україна), до якого під'єднувалися термопари розміщені в модельній конструкції СТ з подальшим використанням стандартних розрахункових та експериментальних методик.

5. Скребковий теплообмінник для попереднього підігрівання рослинної сировини

5.1. Визначення температурного поля та шару сировини на робочій поверхні модельної конструкції скребкового теплообмінника

Визначення рівномірності розподілу температурного поля від ГПРЕНВТ проводили в модельній конструкції вдосконаленого СТ. На рис. 1 наведено схему поперечного перетину теплообмінника з місцями розташування термопар, які під'єднано до багатоканального пристрою ТРМ 16. В моделі СТ на обертальному валу 1 за допомогою шарнірів 2 розташовано лопаті зі зрізаючою крайкою та відбивальною поверхнею 3, що під час обертання вала створюють на робочій поверхні рухливий шар продукту. Нагрівання робочої поверхні здійснюється ГПРЕНВТ 4, охолодження можливе при використанні оболонки 5. Корпус моделі СТ оснащено теплоізоляцією. Під час досліджень температурний режим підтримувався на рівні 60 °С за умови похибки ТРМ 16 – 0,3 °С.

Показання термопар в модельній конструкції СТ (без навантаження по продукту) відображалися в реальному часі за допомогою комп'ютерної програми від 10 термопар без навантаження по продукту. Аналіз отриманих даних підтверджує рівномірність розподілу теплового потоку на нагрівальній поверхні апарата, а саме показання термопар 7–10 у діапазоні (60,3...60,5 °С). Данні з термопар 11–14 (60,0...60,3 °С), підтверджують рівномірність нагрівання на обігрівасій відбивальній поверхні запропонованої шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою. Термопари 15, 16 з даними вимірювання 61,1 °С та 52,2 °С відповід-

но, характеризують незначні втрати в навколишнє середовище в умовах заповнення охолоджуючої оболонки повітряним середовищем, що є додатковою теплоізоляцією апарата. При цьому розбіжність за усіма термопарами у вимірюваннях становила в межах похибки, що підтверджує рівномірність температурного поля при застосуванні зміненого способу теплопідведення, а саме від ГПРЕНВТ та дає можливість його подальшого використання для вдосконалення СТ та інших теплових апаратів.

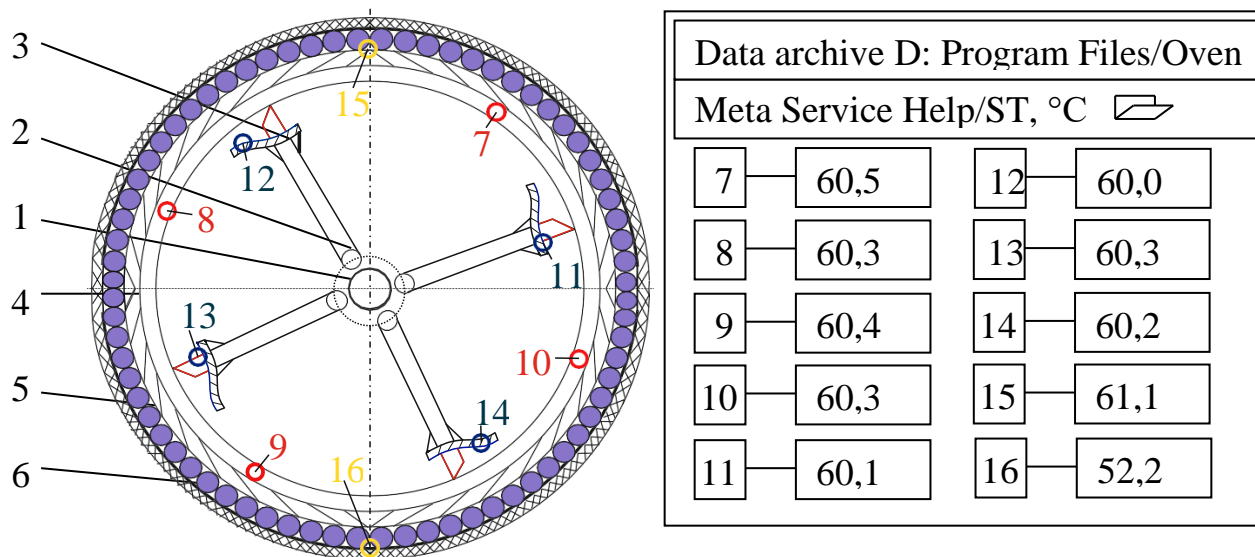


Рис. 1. Схема поперечного перетину модельної конструкції скребкового теплообмінника: 1 – обертальний вал; 2 – шарнірні з’єднання; 3 – шарнірна лопать зі зрізаючою крайкою; 4 – гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінювального типу з безізоляційною поверхнею (ГПРЕНВТ); 5 – оболонка для хладагента; 6 – теплоізоляційний матеріал; розташування термопар (7–10 – зовні нагрівальної поверхні в отворах довжиною 2 мм; 11–14 – на відбивальній поверхні лопатей; 15 – між нагрівачем та охолоджувальною оболонкою; 16 – зовні охолоджувальної оболонки)

Під час обробки рідини у СТ на ефективність процесу підігрівання крім способу теплопідводу значний вплив має конструкція перемішувального пристрою, що утворює рухливий шар рідини на робочій поверхні. У зв’язку з цим було запропоновано порівняти базову конструкцію шарнірної лопаті (рис. 2, а) з запропонованою шарнірною лопаттю зі зрізаючою крайкою (рис. 2, б, поз 1) та відбивальною гріючою поверхнею поз. 2. В умовах порівняння отримані залежності середньої товщини шару рідини δ від частоти обертання вала в моделі удосконаленого СТ (рис. 3) при застосуванні лопатей, зображених на рис. 2.

Отримані данні свідчать, що шарнірна лопать має сумарну товщину шару, яка залежить від швидкості обертання вала та при обертах 50 хв^{-1} складає 5,0 мм, а для 350 хв^{-1} – 1,5 мм, за умови витрати $W=50$ л/год. Для шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою сумарна товщина шару знаходиться в межах 2,65...1,45 мм відповідно, тим самим забезпечуючи підвищену ефективність

перемішування рівномірного шару сировини, запобігаючи утворенню нагару на робочій поверхні, що обігривається.

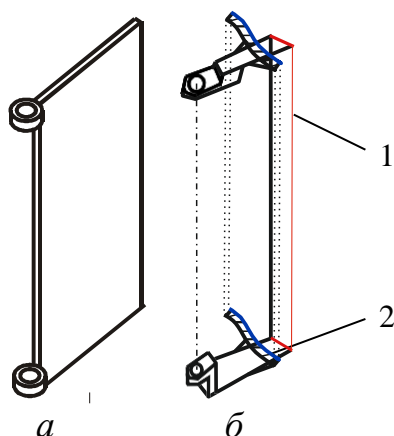


Рис. 2. Схема: *a* – базової шарнірної лопаті; *б* – запропонованою шарнірною лопаттю зі зрізаючою крайкою та відбивальною гріючою поверхнею; 1 – зрізаюча крайка; 2 – відбиваюча поверхня, що гріє

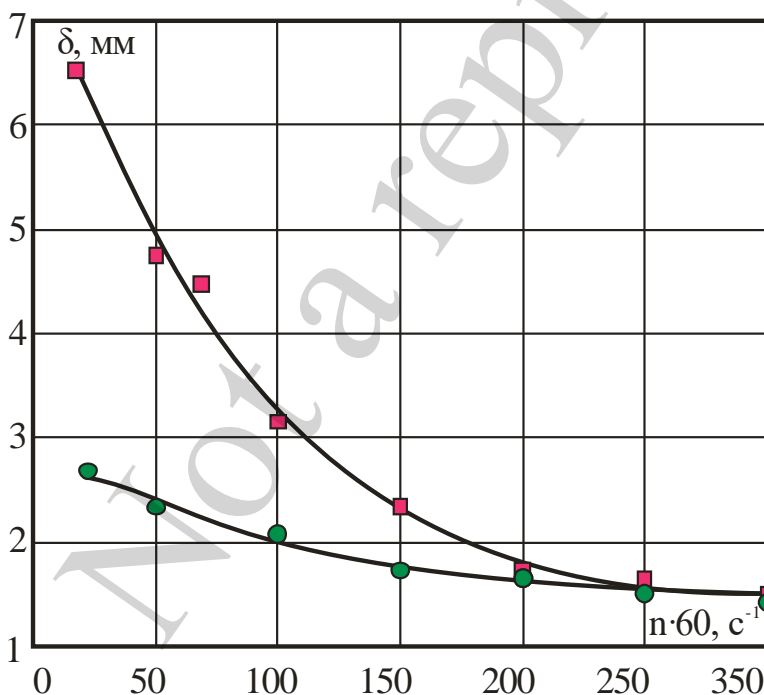


Рис. 3. Залежність середньої товщини шару рідини δ від частоти обертання вала n ($W=50$ л/год): ■ – шарнірна лопатка; ● – шарнірна лопатка зі зрізаючою крайкою

5. 2. Визначення ефективності вдосконаленого скребкового теплообмінника за рахунок вдосконалення способу теплопідведення та конструкції шарнірної лопаті

Для визначення ефективності вдосконаленого скребкового підігрівача проведено порівняльну характеристику витрат енергії на попереднє підігрівання пюреподібної суміші на основі: яблука, абрикоса та кизилу перед концентруванням (табл. 1). Під час розрахунків вхідними даними є витрата продукту, пи-

тома теплоємність сировини та матеріалу робочої поверхні апарату (нержавіюча сталь), а також конструктивні параметри базового підігрівача та СТ (вага, площа грючої поверхні). Вдосконалений СТ порівнювався з підігрівачем з паровою оболонкою.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика вдосконаленого СТ порівняно з підігрівачем з паровою оболонкою

Втрати енергії	Підігрівач з паровою оболонкою	Скребковий теплообмінник (СТ)
Вага апарата	$m^*=1259$ кг	$m=32$ кг
Питомі витрати	$q_{\text{п}}=Q_{\text{зар}}/m=126320,8/500=252,6$ кДж/кг	$q_{\text{п}}=Q_{\text{зар}}/G=52843/0,31=170,4$ кДж/кг
Тривалість обробки	$\tau_{\text{під}}=Q/F \cdot k \cdot \Delta t=97722/2,2 \cdot 1454 \cdot 77=397$ с	$\tau_{\text{СТ}}=L_{\text{ап}}/v_{\text{пл}}=1,0/0,11=9,1$ с
Площа поверхні теплообміну	$F^*=2,2$ м ²	$F=F_{\text{СТ}}+F_{\text{мішалки}}=0,63+0,04=0,67$ м ²
Нагрівання апарата	$Q_{\text{нагр}}=m_1 \cdot c_{\text{СТ}} \cdot (t_k - t_{\text{н}}) + m_2 \cdot c_{\text{СТ}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}) = 670 \cdot 0,48 \cdot (65 - 20) + 455 \cdot 0,48 \cdot (142 - 20) = 41116$ кДж	$Q_{\text{нагр}}=m_{\text{СТ}} \cdot c_{\text{СТ}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}) = 32 \cdot 0,48 \cdot (80 - 20) = 921$ кДж
Нагрівання продукту	$Q_{\text{пр}}=m \cdot c \cdot (t_k - t_{\text{н}}) = 500 \cdot 3,7 \cdot (65 - 20) = 83250$ кДж	$Q_{\text{пр}}=G \cdot c \cdot (t_k - t_{\text{н}}) = 0,31 \cdot 3,7 \cdot (65 - 20) = 51,615$ кДж/с
Загальна кількість	$Q_{\text{зар}}=126320,8$ кДж	$Q_{\text{зар}}=52,843$ кДж/с
Питома металоемність апарата	$m=M/F=1259/2,2=572,2$ кг/м ²	$m=M/F=32/0,67=47,7$ кг/м ²

Примітка. Порівняльні данні базової конструкції МЗ-2С-241аМ взято з літературного джерела [27]*

Порівнюючи отримані розрахункові дані можна зробити висновок, що основний показник ресурсоефективності, а саме питомі витрати енергії на нагрівання об'єму одиниці продукту в СТ – 170,4 кДж/кг (табл. 1), в порівнянні з базовим апаратом – 252,6 кДж/кг, що характеризує зменшення витрат у вдосконаленому СТ в 1,48 рази. При цьому забезпечується наступна тривалість термічної обробки: СТ – 10 с та 7 хв у паровому апараті, відповідно, що має суттєво зниження температурного впливу на сировину, за умов організації безперервного процесу під час використання ГПРЕНВТ. Отримані розрахункові результати, параметри рівномірності температурного поля від ГПРЕНВТ та рівномірності шару сировини, підтверджують ефективність запропонованих рішень під час вдосконалення СТ.

5. 3. Розробка вдосконаленої конструкції скребкового теплообмінника

Отримані результати з визначення рівномірності розподілу температурного поля та шару сировини та розрахункові дані дозволили запропонувати вдосконалену конструкції скребкового теплообмінника. СТ призначений для тепломасообмінної обробки будь-якої сировини, зокрема підігрівання рослинної (рис. 4), має вертикальну робочу технологічну ємність 1. В верхній частині якої змонтовано електродвигун з черв'ячним редуктором 2, який передає регульовану змінну обертального руху валу 3 (ротор) розміщеного в центрі ємності 1. До

ротора 3 за допомогою шарнірних з'єднань 5 фіксуються шарнірні лопаті зі зрізаючою крайкою 6, що зрізають оброблювану сировину під час роботи апарата. Детальний вигляд шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою наведено на рис. 2, б, де 1 – зрізаюча крайка; 2 – відбиваюча поверхня, що гріє. Відбиваюча поверхня 2 призначена для стабілізації гідравлічної течії після носової течії від зрізаючої крайки та притискання зрізаного шару відбиваючою поверхнею 2, яка обігривається додатково ГПРЕНВТ. Покриття поверхні 2 має антипригарні властивості для перешкоджання налипанню та пригорання сировини на ній.

В нижній та верхній частині технологічної ємності 1 розміщені патрубки нагнітання 7 (для безпосереднього подавання сировини на розподільчий диск 4) та її відведення 8. Під час проходження сировиною розподільчого диску 4 утворюється регульована за товщиною плівка (від 2 до 5 мм), яка підхоплюється відцентровою силою шарнірних лопатей зі зрізаючою крайкою 6, забезпечуючи її термічну обробку за рахунок взаємодії з гріючою поверхнею та відведення її крізь патрубок 8.

Обігрівання ємності 1 здійснюється безізоляційним ГПРЕНВТ 9 в умовах повторення ним її геометричної форми, забезпечуючи чіткий стабілізований тепломасообмінний процес – підігрівання. Отримуваний якісний технологічний процес дозволяє замінити спосіб оболонкового обігріву СТ (парою або ж теплоносіями) на електричний. При цьому також зменшуються металоємність апарата, витрати на підігрів теплоносіїв, їх транспортування та обслуговування для реалізації процесів охолодження на зовнішній поверхні ГПРЕНВТ 8. Під час використання в якості охолоджувача, СТ має тонкостінну оболонку 11, внутрішня поверхня якої являє собою спіральну форму. В верхній та нижній частини оболонка 11 має патрубки 12 та 13 для циркуляції холодоагенту, зовнішня поверхня оболонки 11 додатково вкрита теплоізоляційним матеріалом 14, що одночасно є корпусом апарата. Слід відзначити, під час підігрівання оболонка 11 знаходиться без носія, лише повітря, яке додатково виконує теплоізоляційні властивості під час роботи ГПРЕНВТ 9.

Обертання вдосконаленого перемішувального пристрою 6 здійснюється від електроприводу з черв'ячним редуктором 2. Для піднімання перемішувального пристрою 6 в нижній частині розташований механізм для піднімання вала 10.

Отримані данні дозволили сформулювати основні технічні параметри вдосконаленого СТ, які були визначені практично-науковими та конструкторськими методами апробації модельної конструкції.

Запропонований апарат характеризується конструкторсько-технологічною ресурсоефективністю завдяки впровадженню інженерним рішенням з забезпечення заміни системи парового обігріву, ліквідації технічних мереж трубопроводів теплоносіїв. Важливою особливістю запропонованої конструкції шарнірною лопаті зі зрізаючою крайкою є постійне підрізання шару продукту, що запобігає його пригоранню та створює додаткове підігрівання підрізаємого шару відбивальною поверхнею для додаткової стабілізації температурного поля сировини. Також забезпечується покращення експлуатаційних властивостей, зокрема автоматизації в умовах використання електричного нагрівача з чіткою динамікою, на відміну від паропідведення. А отже забезпечується мінімізований температурний вплив на сировину (нагрівання протягом 10 с під час підігріву з 20 до 65 °С).

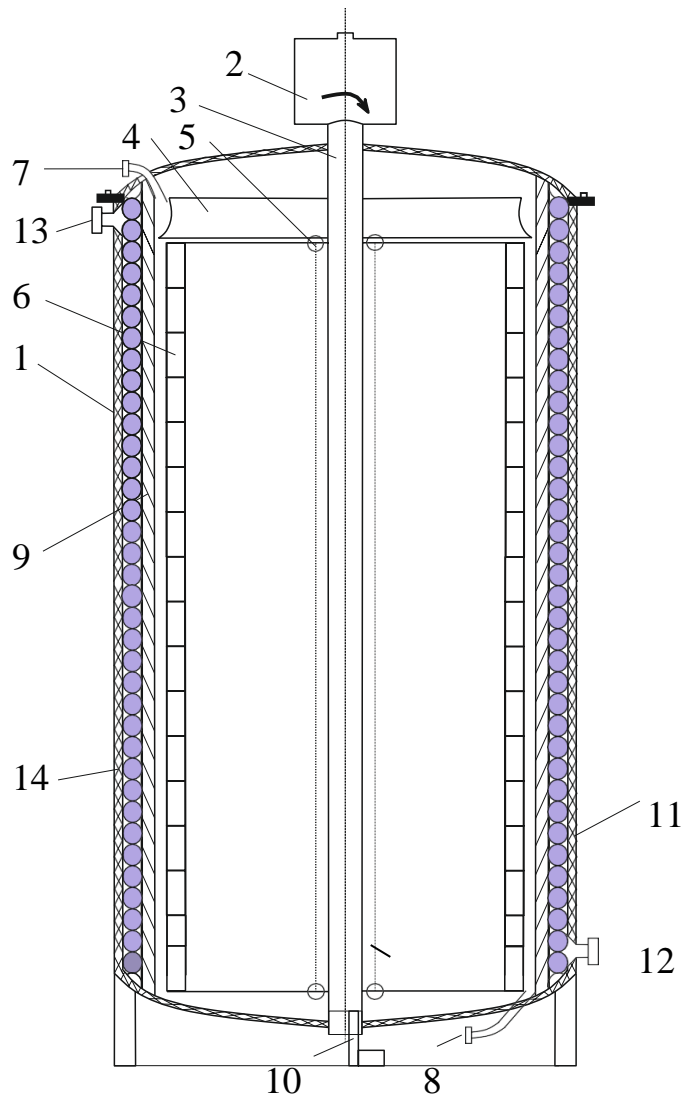


Рис. 4. Схема вдосконаленого модельного скребкового теплообмінника: 1 – вертикальна робоча технологічна ємність; 2 – електродвигун з черв'ячним редуктором; 3 – обертальний вал (ротор); 4 – розподільчий диск; 5 – шарнірні з'єднання; 6 – шарнірна лопать зі зрізаючою крайкою; 7 – патрубок нагнітання сировини; 8 – патрубок відведення сировини; 9 – гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінювального типу з безізоляційною поверхнею (ГПРЕНВТ); 10 – механізм піднімання вала; 11 – оболонка для хладогента; 12, 13 – патрубки для циркуляції холодоагенту; 14 – теплоізоляційний матеріал

Таблиця 2

Технічні параметри вдосконаленого скребкового теплообмінника

Технічний параметр	Значення
Площа нагрівальної поверхні, м ²	0,67
Потужність двигуна обертового приводу, кВт	1,0
Температура теплопередавальної поверхні від ГПРЕНВТ, °С	до 90
Частота обертання мішалки, хв ⁻¹	50...350
Вага (без завантаження), кг	32

6. Обговорення результатів підігрівання рослинної сировини в удосконаленому скребковому теплообміннику

Впровадження скребкового теплообмінника з безізоляційний електричним нагрівом ГПРЕНВТ та запропонованою конструкцією шарнірної лопаті зі зрізаючої крайкою, яка має гріючу відбивальну поверхню (рис. 4), забезпечує оптимальну товщину шару продукту на робочій поверхні в умовах рівномірного нагрівання. Також можливе використання скребкового теплообмінника, як охолоджувача ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, рис. 1, поз. 11), за умови проходження холодоагенту спіральною оболонкою. Оболонка одночасно виконує роль теплоізоляції при нагріванні. Підігрівання рослинної сировини відбувається до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, що забезпечує максимальне збереження вітаміну С, а отже й інших фізико-хімічних сполук. Розрахунковим шляхом встановлено зменшенням в 1,48 раз питомих витрат енергії затрачуваної на нагрівання одиниці об'єму продукту (табл. 1) в умовах забезпечення тривалості термічної обробки протягом 10 с, в порівнянні з параметрами нагрівання в паровому підігрівачі (397 с).

На сьогодні залишаються відкритими питання з впровадження не лише низькотемпературної обробки, а й забезпечення рівномірного перемішування потоку від лопатей, акцентуючи увагу на доцільності досліджень в цьому напрямі. Під час досліджень підтверджено забезпечення рівномірності розподілу теплового потоку на нагрівальній робочій поверхні апарата та відбивальній обігріваній поверхні шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою ($60,0\text{...}60,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, рис. 1) (рис. 2, б). Встановлено, що запропонована шарнірна лопать зі зрізаючою крайкою має сумарну товщину шару рідини при частоті 50 хв^{-1} – 2,65 мм, а при 350 хв^{-1} – 1,5 мм, порівняно з стандартною шарнірною лопаттю (товщина шару від 5,0 мм 1,5 мм) при витраті продукту $W=50\text{ л/год}$ (рис. 3).

Отримані результати підтверджують ефективність впроваджених інженерських рішень з вирішення науково-прикладної задачі з забезпечення рівномірності розподілу температури та шару сировини в удосконаленому скребковому теплообміннику для попереднього підігрівання рослинної сировини перед концентруванням. Запропонована конструкція володіє ресурсоефективністю (табл. 1) та незначними втратами в навколишнє середовище за умов використання охолоджуючої оболонки при заповненні її повітряним середовищем (данні термопар 15, 16 – $61,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $52,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно, рис. 1).

Вдосконалений СТ рекомендується використовувати для швидкого підігрівання рослинної сировини з застосуванням щадних температурних режимів до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, а саме перед концентруванням для забезпечення максимального збереження її початкових властивостей. Порушення будь яких технологічних параметрів неминуче призведе до зниження якості отримуваних виробів, а також зменшить ресурсоефективність обладнання.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на деталізацію процесів попереднього підігрівання рослинної сировини та інших харчових сумішей для формування загальних оптимізованих режимів з забезпеченням рівномірності розподілу сировини та їх впливу на кольорові змінення, як один з чинників збереження якості продукту в цілому.

7. Висновки

1. Підтверджено рівномірність розподілу теплового потоку на нагрівальній поверхні (в діапазоні 60,3...60,5 °C) й на обігріваної відбивальній поверхні шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою (60,0...60,3 °C). Також скребковий теплообмінник характеризується незначними втратами в навколишнє середовище в умовах заповнення охолоджуючої оболонки повітряним середовищем. Визначено більш рівномірний розподіл шару сировини від запропонованої шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою, яка має сумарну товщину шару рідини при частоті 50 хв⁻¹ – 2,65 мм, а при 350 хв⁻¹ – 1,5 мм, порівняно з стандартною шарнірною лопаттю (товщина шару від 5,0 мм 1,5 мм) при витраті продукту $W=50$ л/год. Отримані порівняльні результати стосовно товщини шару сировини підтверджують більшу ефективність запропонованої шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою.

2. Розрахункові дані скребкового теплообмінника під час порівняння її з підігрівачем на основі парового обігріву підтверджують підвищення його ресурсоефективності, оскільки питомі витрати енергії на нагрівання одиниці об'єму продукту в СТ становлять 170,4 кДж/кг (табл. 1), в порівнянні з аналогом – 252,6 кДж/кг, що характеризує зменшення витрат у вдосконаленому СТ в 1,48 рази. При цьому забезпечується швидке підігрівання продукту у удосконаленій конструкції СТ – до 10 с, що призведе до підвищення якості технологічного процесу.

3. Удосконалена конструкція скребкового теплообмінника з повторюючим геометрію робочої поверхні безізоляційним електричним нагрівом ГПРЕНВТ. В якості перемішуючого пристрою запропоновано конструкцію шарнірної лопаті зі зрізаючою крайкою, яка має гріючу відбивальну поверхню для стабілізації необхідної товщини шару продукту на робочій поверхні. Скребковий теплообмінник може використовуватись як охолоджувач (-15 °C) за умови проходження холодоагенту в спіральну оболонку.

8. Подяка

Науково-дослідному центру «Новітні біотехнології та обладнання для виробництва харчової продукції з високими оздоровчими властивостями» (Україна) за реалізацію та успішну апробацію роботи в рамках держбюджетної теми № 1-19 БО.

Література ф

1. Алабина, Н. М., Дроздова, В. И., Володзько, Г. В. и др. (2006). Плодоовощные консервы профилактического назначения. Пищевая промышленность, 11, 78–79.
2. Habanova, M., Saraiva, J. A., Holovicova, M., Moreira, S. A., Fidalgo, L. G., Haban, M. et. al. (2019). Effect of berries/apple mixed juice consumption on the positive modulation of human lipid profile. Journal of Functional Foods, 60, 103417. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103417>
3. Huang, L., Bai, L., Zhang, X., Gong, S. (2019). Re-understanding the antecedents of functional foods purchase: Mediating effect of purchase attitude and

moderating effect of food neophobia. *Food Quality and Preference*, 73, 266–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.001>

4. Misra, N. N., Koubaa, M., Roohinejad, S., Juliano, P., Alpas, H., Inácio, R. S. et. al. (2017). Landmarks in the historical development of twenty first century food processing technologies. *Food Research International*, 97, 318–339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.001>

5. Oliinyk, S., Samokhvalova, O., Zaparenko, A., Shidakova-Kamenyuka, E., Chekanov, M. (2016). Research into the impact of enzyme preparations on the processes of grain dough fermentation and bread quality. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (11 (81)), 46–53. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70984>

6. Shydakova-Kamieniuka, E., Novik, A., Zhukov, Y., Matsuk, Y., Zaparenko, A., Babich, P., Oliinyk, S. (2019). Estimation of technological properties of nut meals and their effect on the quality of emulsion for butter biscuits with liquid oils. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (98)), 56–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.159983>

7. Скребковые теплообменники «Контерм». URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/alfa-laval/teploobmenniki/10319/28248.pdf>

8. Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Sabadash, S. et. al. (2018). Universal multifunctional device for heat and mass exchange processes during organic raw material processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (96)), 47–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.148443>

9. Boesveldt, S., Bobowski, N., McCrickerd, K., Maître, I., Sulmont-Rossé, C., Forde, C. G. (2018). The changing role of the senses in food choice and food intake across the lifespan. *Food Quality and Preference*, 68, 80–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.02.004>

10. Ahmed, J., Ramaswamy, H. S. (2006). Viscoelastic properties of sweet potato puree infant food. *Journal of Food Engineering*, 74 (3), 376–382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.010>

11. Zahorulko, A., Zagorulko, A., Fedak, N., Sabadash, S., Kazakov, D., Kolodnenko, V. (2019). Improving a vacuum-evaporator with enlarged heat exchange surface for making fruit and vegetable semi-finished products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (11 (102)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178764>

12. Загорулько, А. М., Загорулько, О. Є. (2016). Пат. № 108041 UA. Гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінюючого типу. № u201600827; заявл. 02.02.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

13. 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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126400>

14. Кіптела, Л. В., Загорулько, О. Є., Загорулько, А. М. (2015). Вдосконалення обладнання для виробництва плодоягідних напівфабрикатів. *Восточно-*

Европейский журнал передовых технологий, 2 (10 (74)), 4–8. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39455>

15. Черевко, А. И., Киптелая, Л. В., Михайлов, В. М., Загорулько, А. Е., Загорулько, А. Н. (2015). Разработка энергоэффективной ИК-сушилки для растительного сырья. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 4 (8 (76)), 36–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47777>

16. Cherevko, O., Mykhaylov, V., Zahorulko, A., Zahorulko, A., Borysova, A. (2018). Color characteristics of dried three-component fruit and berry pastes. *Food Science and Technology*, 12 (1). doi: <https://doi.org/10.15673/fst.v12i1.840>

17. Qiu, J., Kloosterboer, K., Guo, Y., Boom, R. M., Schutyser, M. A. I. (2019). Conductive thin film drying kinetics relevant to drum drying. *Journal of Food Engineering*, 242, 68–75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.021>

18. Halder, A., Dhall, A., Datta, A. K., Black, D. G., Davidson, P. M., Li, J., Zivanovic, S. (2011). A user-friendly general-purpose predictive software package for food safety. *Journal of Food Engineering*, 104 (2), 173–185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.11.021>

19. Fayolle, F., Belhamri, R., Flick, D. (2013). Residence time distribution measurements and simulation of the flow pattern in a scraped surface heat exchanger during crystallisation of ice cream. *Journal of Food Engineering*, 116 (2), 390–397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.009>

20. Błasiak, P., Pietrowicz, S. (2017). An experimental study on the heat transfer performance in a batch scraped surface heat exchanger under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 379–390. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.049>

21. Crespí-Llorens, D., Vicente, P., Viedma, A. (2018). Experimental study of heat transfer to non-Newtonian fluids inside a scraped surface heat exchanger using a generalization method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 75–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.115>

22. Imran, A., Rana, M. A., Siddiqui, A. M. (2017). Study of a Eyring–Powell Fluid in a Scraped Surface Heat Exchanger. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 4 (1). doi: <https://doi.org/10.1007/s40819-017-0436-z>

23. Martínez, D. S., Solano, J. P., Vicente, P. G., Viedma, A. (2019). Flow pattern analysis in a rotating scraped surface plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 160, 113795. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113795>

24. Błasiak, P., Pietrowicz, S. (2019). A numerical study on heat transfer enhancement via mechanical aids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 203–215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.116>

25. Acosta, C. A., Yanes, D., Bhalla, A., Guo, R., Finol, E. A., Frank, J. I. (2020). Numerical and experimental study of the glass-transition temperature of a non-Newtonian fluid in a dynamic scraped surface heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119525. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119525>

26. Hernández-Parra, O. D., Plana-Fattori, A., Alvarez, G., Ndoye, F.-T., Benkhelifa, H., Flick, D. (2018). Modeling flow and heat transfer in a scraped surface

heat exchanger during the production of sorbet. Journal of Food Engineering, 221, 54–69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.09.027>

27. Вакуум-выпарная установка МЗ-2С-241АМ. URL: http://dagprod mash.ru/vakuum-vyparnaia_ustanovka_m3-2s-241am.html

28. Черевко, О. І., Маяк, О. А., Костенко, С. М., Сардаров, А. М. (2019). Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 1 (29), 75–85.

Not a reprint