

УДК 663.81:66.021.4  
DOI: 10.31866/2616-7468.2.2.2019.188206

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСІ УВАРЮВАННЯ ОВОЧЕВОГО СОКУ

**Олександр Черевко,**  
доктор технічних наук, професор,  
Харківський державний університет  
харчування та торгівлі,  
Харків, Україна,  
otayak777@gmail.com  
<http://orcid.org/0000-0001-6047-8186>  
© Черевко О., 2019

**Ольга Маяк,**  
кандидат технічних наук, доцент,  
Харківський державний університет  
харчування та торгівлі,  
Харків, Україна,  
otayak777@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3059-4589>  
© Маяк О., 2019

**Станіслав Костенко,**  
старший викладач,  
Харківський державний університет  
харчування та торгівлі,  
Харків, Україна,  
dlyastasa@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-0268-8008>  
© Костенко С., 2019

**Азіз Сардаров,**  
аспірант,  
Харківський державний університет  
харчування та торгівлі,  
Харків, Україна,  
otayak777@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0973-8197>  
© Сардаров А., 2019

**Метою дослідження** є вдосконалення теплообмінного обладнання для виробництва концентратів з овочевої сировини, а саме вакуум-випарного апарату з перемішувачем пристроєм Інструментом для визначення переваг запропонованих технічних рішень обрано системний аналіз, а саме імітаційне моделювання. **Методи дослідження.** Запропоновано новий спосіб концентрування овочевої сировини, а саме розділення на фракції – сік та вичавки, та їх окрема переробка з подальшим поєднанням в різному співвідношенні. Уварювання соку в випарному апараті з мішалкою під вакуумом є основним процесом теплообміну в запропонованому способі переробки. Мішалка являє собою спіральний порожнистий вал з можливістю підведення в порожнину теплоносія, в данному випадку – пари. У результаті проведених експериментів було досліджено залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів розробленої мішалки. Аналіз отриманих залежностей дозволив визначити ефективність запропонованих технічних рішень. Експериментальні дослідження стали підґрунтям для системного аналізу процесу, а саме імітаційного моделювання зміни температурного поля в процесі уварювання овочевого соку. **Результати.** Запропоновано новий спосіб переробки овочевої сировини. Для його реалізації розроблений вакуум-

випарний апарат з удосконаленим перемішуючим пристроєм. Проведені експериментальні дослідження з визначення коефіцієнту тепловіддачі під час концентрування соку. Здійснено імітаційне моделювання змін температурного поля в апараті та загального робочого циклу випарного апарату періодичної дії. Системно-динамічне моделювання виконувалося в середовищі програмного комплексу Vensim. Кінетика температури в процесі нагрівання контролювалася в експериментальному вакуум-випарному апараті. **Висновки та обговорення.** Визначено залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів мішалки під час уварювання овочевого соку в розробленому вакуум-випарному апараті. Створена системно-динамічна модель процесу тепловіддачі, а саме визначено кінетику температури в апараті, що робить можливим подальше комп'ютерне експериментування на підґрунті визначених практичним дослідженням зв'язків складної системи теплообміну.

**Ключові слова:** концентрований сік, вакуум-випарний апарат, кінетика температури, мішалка, теплообмін, імітаційне моделювання, системний аналіз.

### **Актуальність проблеми**

*Постановка проблеми.* Проблема ресурсозбереження під час переробки харчової сировини, зокрема, плодів та овочів і до сьогодні стоїть доволі гостро. До 60% сировини після переробки є відходами. Це питання вирішують багато науковців (Мамонтов, 2009; Петрова, 2010). Крім того, режими обробки часто не відповідають вимогам збереження біологічної цінності готової продукції. Відомо, що найбільш ефективним способом збереження, а іноді і збільшення біологічної активності сполук, що входять до складу вихідної сировини, є концентрування, зокрема уварювання та сушіння (Осецький, Гольцев, & Севастьянов, 2019; Zagorulko et al., 2018).

Основним теплообмінним процесом запропонованого способу виробництва концентрованих продуктів з овочевої сировини є уварювання відділеного соку у вакуум-випарному апараті періодичної дії з удосконаленою конструкцією парової мішалки.

Конструкції перемішуючих пристроїв, що використовують під час концентрування харчових мас, обирають залежно від властивостей речовини та поставлених технологічних завдань. Складність концентрування соків із м'якоттю полягає в їхній значній в'язкості, яка в процесі уварювання швидко збільшується, що ускладнює випаровування вологи й веде до значної зміни смаку й кольору концентрованих продуктів у результаті місцевого перегріву.

Крім того, слід зазначити, що теплообмін під час кипіння рідин, які в процесі змінюють свою в'язкість, є складним для описання процесом. Тому під час узагальнення експериментальних даних виникає складність одержання критеріїв подібності й встановлення критеріальних залежностей, які дадуть змогу описати, спрогнозувати процес та вирішити питання оптимізації (Промтов, 2004; Панфилов, 2001). Відомі імітаційні моделі процесу тепломасообміну, а саме «інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів, які надають системне підґрунтя для їх описання і, як наслідок, інтенсифікації та оптимізації» (Потапов, 2018; Potapov & Kostenko, 2016).

### **Мета і методи дослідження**

*Мета статті.* Обґрунтування процесів і вдосконалення теплообмінного обладнання для виробництва концентратів з овочевої сировини, а саме вакуум-

випарного апарату з перемішуючим пристроєм. Інструментом для визначення переваг запропонованих технічних рішень обрано системний аналіз, а саме імітаційне моделювання.

*Методи дослідження.* Системний аналіз пов'язує і узагальнює всі засоби вдосконалення технологічного процесу, що дозволяє не тільки одержати кількісну оцінку, але й визначити шляхи впровадження його у виробництво (Сафонова и др., 2000). Разом з розробкою прогресивних процесів харчової технології потрібно створювати імітаційні моделі, необхідні для вирішення задач удосконалення. Імітаційне дослідження дозволяє поєднувати особливості експериментального підходу і специфіку використання засобів комп'ютерної підтримки, в даному випадку, використання спеціалізованого програмного пакету Vensim, оптимізувати технологічний процес за обраними реакціями шляхом комп'ютерного експерименту зі зміною та комбінуванням значень критеріїв, забезпечуючи якісний продукт (Меркулова, 2011). Системно-динамічне моделювання передає динамічну поведінку системи, тобто її функціонування у часі. У системній динаміці ідентифікують зразки поведінки, які демонструються ключовими змінними, і надалі створюють модель, яка відтворює задані зразки.

### Результати дослідження

Був розроблений наступний спосіб виробництва овочевих концентратів (рис. 1). Основні технологічні етапи включають: підготовку овочевої сировини, подрібнення, розділення маси на сік і вичавки, фільтрування соку, концентрування соку до вмісту сухих речовин 70...75 % шляхом випарювання під вакуумом 0,09 МПа при температурі 45...50 °С, подрібнення вичавок після відділення соку, сушіння під вакуумом при вібраційному перемішуванні подрібнених вичавок при температурі 45...50 °С до вмісту сухих речовин 89...91 %. Продуктів в розробленому способі може бути отримано декілька це: концентрований сік, концентрат з різним вмістом сушених вичавок, залежно від технологічних задач, сушені вичавки для використання в якості добавок до оздоровчого харчування.

Для концентрування соку у вакуум-випарному апараті було розроблено новий пристрій для перемішування та нагрівання харчових мас (рис. 2).

Скребки розміщені на спіралі таким чином, що під час руху перекривають один одного. Під час обертання мішалки скребки просуваються біля поверхні теплообмінної стінки апарату, утворюючи гвинтову поверхню, що сприяє перемішуванню пристінного ламінарного шару продукту. Це запобігає його прилипанню, усуває застійні зони, унаслідок чого відбувається вирівнювання температур і рівномірний перебіг процесу.

Пристрій працює таким чином: привідний вал 6, обертаючись, приводить у рух усю конструкцію. Це забезпечується жорстким з'єднанням втулкової муфти 8 привідного вала та обертального спірального порожнистого валу 9. З'єднання муфти 8 із валами здійснюється за допомогою штифтів 7. Під час обертання скребки рухаються, притискаючись до внутрішньої стінки робочої камери апарату 1 рухливою частиною скребка 3 за рахунок гнучкої пластини 10, що кріпиться до нерухомої частини скребка 2 болтовим з'єднанням 4. Подача теплоносія здійснюється з нижньої частини апарату у порожнистий вал. Для видалення повітря встановлений регулювальний патрубок повітря 5.

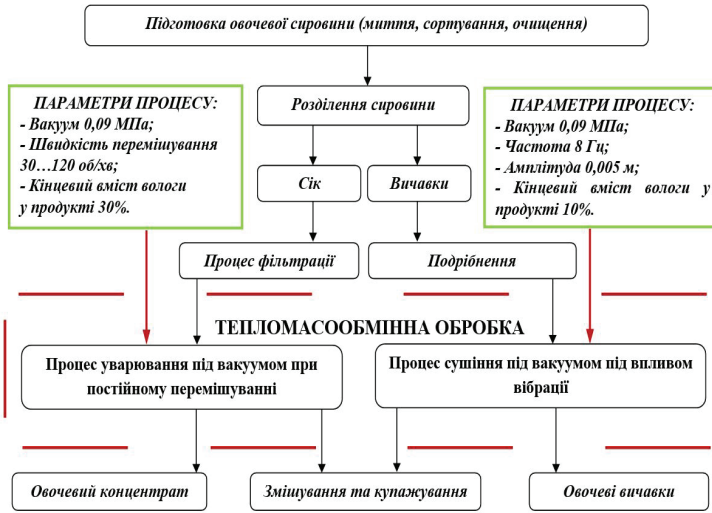


Рис. 1. Спосіб виробництва концентратів з овочевої сировини  
 Джерело: власна розробка

Fig. 1. Method of producing concentrates from vegetable raw materials  
 Source: own development

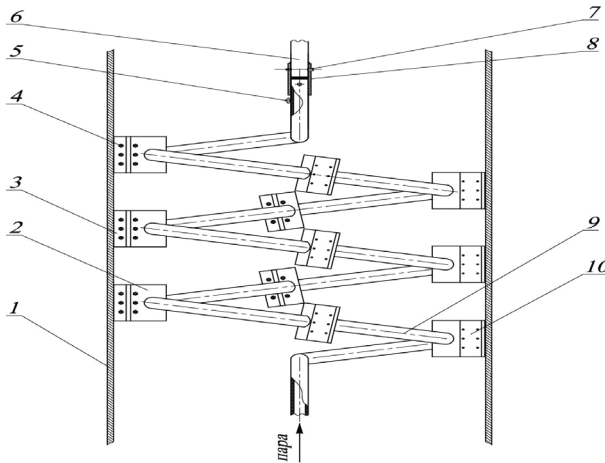


Рис. 2. Пристрій для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів:  
 1 – теплообмінна стінка робочої камери; 2 – нерухома частина скребка;  
 3 – рухома частина скребка; 4 – болтове з'єднання; 5 – патрубок для відведення повітря;  
 6 – привідний вал; 7 – штифти; 8 – втулкова муфта; 9 – спіральний металевий трубчастий вал для підведення теплоносія  
 Джерело: власна розробка

Fig. 2. Device for mixing and heating viscous foods:  
 1 – heat exchanger wall of the working chamber; 2 – fixed part of the scraper;  
 3 – moving part of the scraper; 4 – bolt connection; 5 – air outlet; 6 – drive shaft; 7 – pins;  
 8 – sleeve coupling; 9 – is a helical metal tubular structure for steam supply  
 Source: own development

Було проведено низку експериментів з визначення залежності коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів мішалки (рис. 3).

Для оцінювання ефективності використання нової мішалки були проведені експерименти з дослідження тепловіддачі з використанням якірної мішалки та шнекової скребкової мішалки. Якірну мішалку було обрано, як найбільш розповсюджену конструкцію, яка використовується в харчовій промисловості для перемішування в'язких харчових мас.

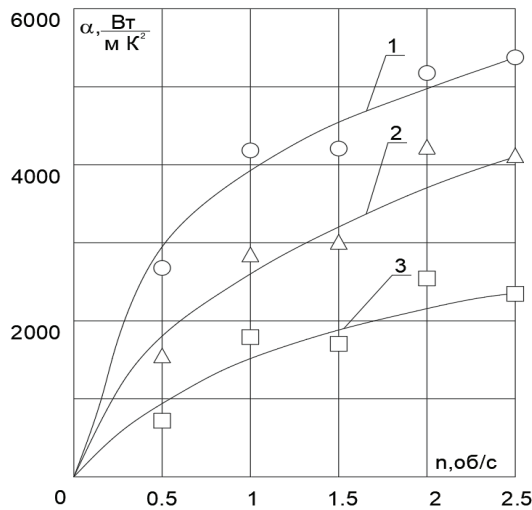


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  (Вт/м<sup>2</sup> К) від числа обертів мішалки  $n$  (с<sup>-1</sup>): 1 – пристрій для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів; 2 – шнекова скребкова мішалка; 3 – якірна мішалка

Джерело: власна розробка

Fig. 3. The dependence of the heat transfer coefficient  $\alpha$  (W/m<sup>2</sup> K) on the number of revolutions of the mixer  $n$  (c<sup>-1</sup>): 1 – device for mixing and heating viscous food;

2 – screw scraper mixer; 3 – anchor stirrer

Source: own development

Аналіз експериментальних даних показав, що зі збільшенням числа обертів коефіцієнт тепловіддачі збільшується. Це пояснюється збільшенням швидкості вимушеної конвекції, турбулізацією потоку й зменшенням в'язкості неньютонівської рідини внаслідок руйнування її структури під впливом мішалки. Однак експериментальні значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  для шнекової скребкової мішалки на 35–40% менші, ніж запропонованого пристрою для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів.

Такий вплив на тепловіддачу пояснюється тим, що відбувається інтенсифікація теплообміну за рахунок використання спірального порожнистого валу для підведення теплоносія, що сприяє збільшенню площі теплообмінної поверхні.

Коефіцієнти тепловіддачі в разі використання якірної мішалки на 50–60% менші, ніж в експериментальній мішалки. Це пояснюється тим, що руйнування структури харчової маси і, як наслідок, зменшення в'язкості неньютонівської рідини, за тих самих чисел обертів значно менше під впливом якірної мішалки, ніж

у разі застосування експериментальної пристрою для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів.

За використання програмного комплексу Vensim було створено імітаційну модель кінетики розігріву овочевого соку. Одиницею виміру часу в моделі була секунда, що відповідає терміну найменшої затримки. Термін моделювання складав 2500 секунд. На рис. 4 наведено імітаційну модель процесу уварювання морквяного соку. Для перевірки результатів реальне уварювання здійснювалося в експериментальному вакуум-випарному апараті.

Шляхом імітаційного моделювання визначено кінетику температури морквяного соку за умов перемішування з частотою 0,5, 1,5 та 2,5  $\text{c}^{-1}$ , що забезпечує значення коефіцієнта тепловіддачі 3560, 5340, 6230  $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$  відповідно.

Екзогенні керовані змінні:

- геометричні компоненти (площа теплопередачі вала 5,7  $\text{м}^2$ , площа теплопередачі оболонки 16,8  $\text{м}^2$ , об'єм продукту 7,5  $\text{м}^3$ , товщина стінки, яка розділяє теплоносій та продукт 0,003 м);

- теплофізичні компоненти (коефіцієнт тепловіддачі відповідно до частоти перемішування 3560, 5340, 6230  $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$ , коефіцієнт теплопровідності стінки 380  $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$ , густина продукту 988  $\text{кг}/\text{м}^3$ , питома теплоємність продукту 4181  $\text{Дж}/\text{кг К}$ );

- температурні компоненти (початкова температура продукту 20  $^{\circ}\text{C}$ , температура теплоносія 106  $^{\circ}\text{C}$ ).

Ендогенні керовані змінні:

- площа теплообміну, що складається з площ теплопередачі вала та оболонки;
- відношення об'єму продукту до площі теплообміну.

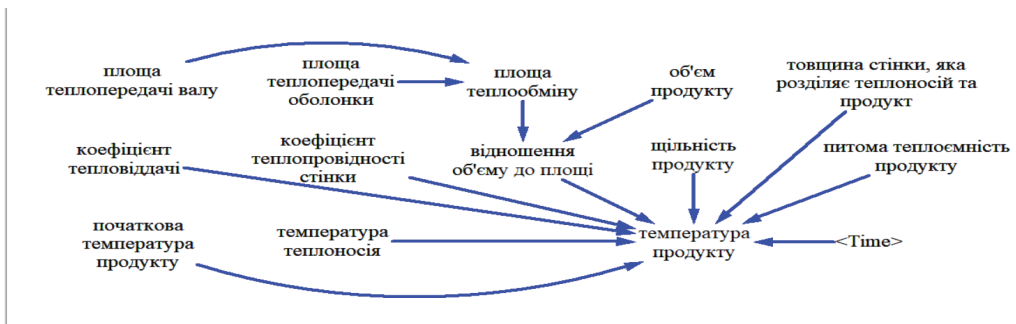


Рис. 4. Імітаційна модель кінетики розігріву овочевого соку

Джерело: власна розробка

Fig. 4. Simulation model of the kinetics of heating the vegetable juice

Source: own development

Моделним відгуком, або реакцією моделі, є температура продукту. Усі чинники мають ефект взаємодії, тобто комбінованого впливу на реакцію моделі (рис. 5).

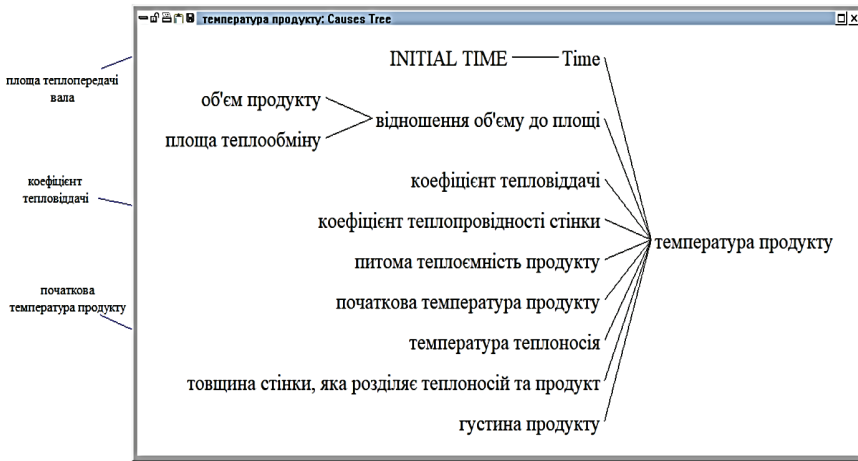


Рис. 5. Дерево причин функції відгуку – температури продукту  
Джерело: власна розробка

Fig.5. The tree of reasons for the response function is product temperature  
Source: own development

Графік температури продукту наведено на рис. 6.

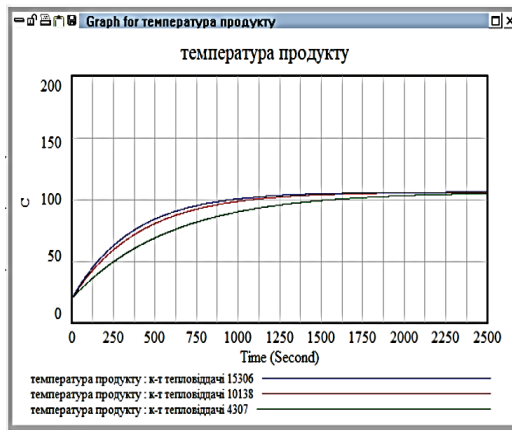


Рис. 6. Температура продукту за частоти обертання: 1 – 2,5 с<sup>-1</sup>; 2 – 1,5 с<sup>-1</sup>; 3 – 0,5 с<sup>-1</sup>  
Джерело: власна розробка

Fig. 6. Product temperature at speed: 2,5 s<sup>-1</sup>; 2 – 1,5 s<sup>-1</sup>; 3 – 0,5 s<sup>-1</sup>  
Source: own development

Для обґрунтування використання розробленого пристрою для перемішування та нагрівання було проведено системно-динамічне моделювання процесу. На основі раніше проведених досліджень було встановлено пряму залежність продуктивності апаратів від способу нагріву апаратів та режимів роботи.

На рис. 7 представлена імітаційна потокова модель процесу уварювання овочевого соку в вакуум випарному апараті з різними перемішувачами. Термін моделювання – 480 хвилин (8 годин).

Для реалізації імітаційної моделі було зроблено наступні припущення:

- затримки на операціях відповідали рекомендаціям з експлуатації;
- терміни теплової обробки відповідали типовому обладнанню;
- втрати на операціях відповідали експериментальним дослідженням;
- залишок продукту відсутній;
- якість продукту незмінна.

Рівні «сік» та «концентрат» визначаються відповідною різницею керованих потоків – вхідного потоку отримання та вихідного потоку відправки. Отримання соку визначалося сировиною, отримання концентрату – уварюванням соку. Відправка соку визначалася рівнем «сік», відправка концентрату – рівнем «концентрат».

Екзогенні керовані змінні:

- кількість завантажень;
- коефіцієнт паронагрівання;
- коефіцієнт уварювання;
- термін завантаження;
- термін вивантаження;
- термін уварювання.

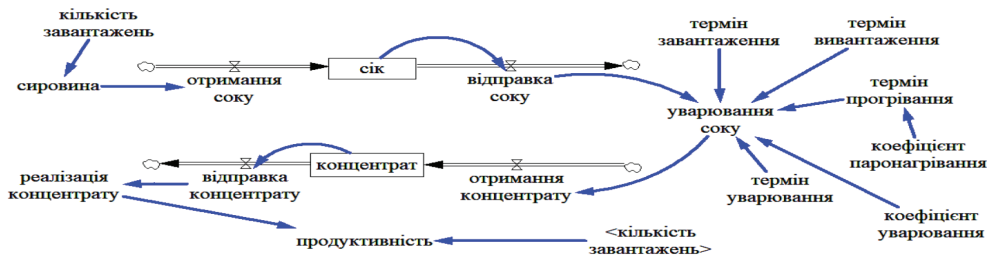


Рис. 7. Імітаційна модель уварювання соку

Джерело: власна розробка

Fig. 7. Simulation model of juice boiling

Source: own development

Ендогенні керовані змінні:

- сировина відповідала періодичному завантаженню 800 кг відповідно до кількості завантажень (6 або 8) протягом 480 хвилин (8 годин);
- термін прогрівання визначався добутком 20 хв та коефіцієнта паронагрівання;
- уварювання соку визначалося фіксованою затримкою добутку відправки соку та коефіцієнта уварювання на суму термінів завантаження, прогрівання, уварювання та вивантаження;
- реалізація концентрату відповідала відправці концентрату.



Модельним відгуком, або реакцією моделі, була продуктивність, яка визначалась відношенням добутку реалізації концентрату та кількості завантажень до 8 годин (рис. 8).

Слід зазначити, що всі фактори комбіновано впливають на реакцію моделі. Було використано наступні рівні факторів:

- коефіцієнт паронагрівання під час концентрування в апараті з розробленим паровим пристроєм для перемішування дорівнював 10 хв/20 хв, під час концентрування зі шнековою мішалкою 20 хв/20 хв;
- коефіцієнт уварювання дорівнював 62,5 кг/800,0 кг;
- термін завантаження становив 5хв;
- термін вивантаження становив 5 хв;
- термін уварювання становив 40 хв.

Експеримент проводився із кількістю 6 завантажень для концентрування зі шнековою мішалкою («концентрування») та 8 завантажень для концентрування в апараті з розробленим паровим пристроєм для перемішування («пароконцентрування»).

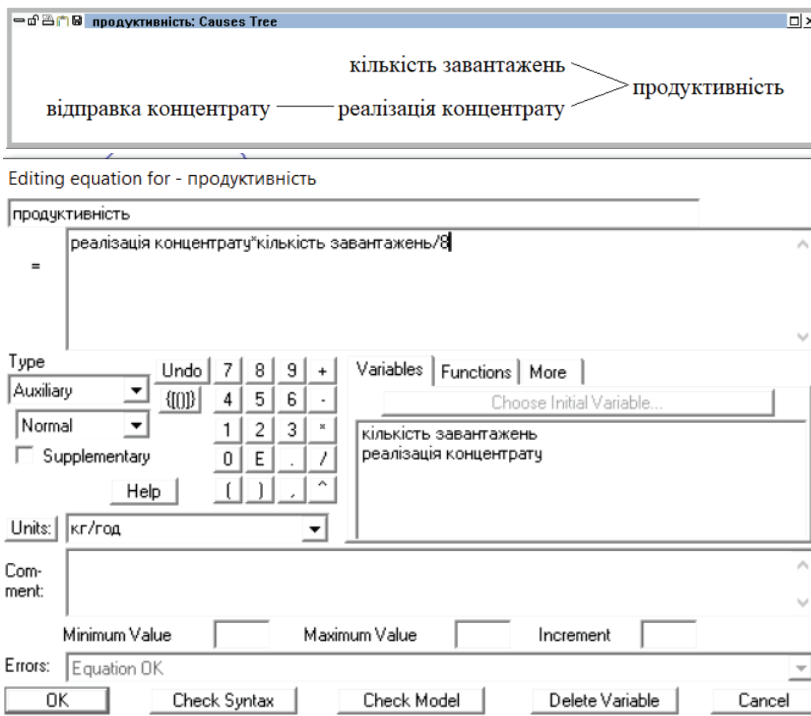


Рис. 8. Дерево причин та рівняння реакції моделі «продуктивність»  
Джерело: власна розробка

Fig. 8. Tree of causes and equation of reaction of model “productivity”  
Source: own development

Характер та значення реалізації концентрату наведено на рис. 9 та 10.

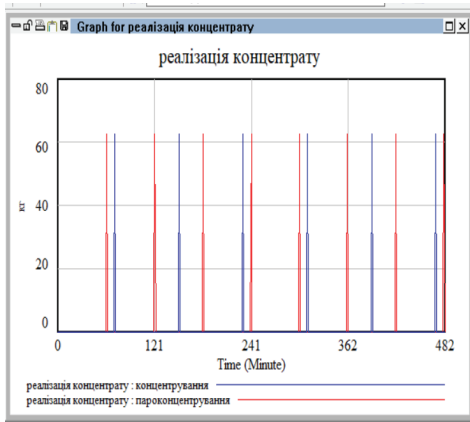


Рис. 9. Характер реалізації концентрату (кг):  
 а – концентрування,  
 б – пароконцентрування  
 Джерело: власна розробка

Fig. 9. The nature of the concentrate implementation:  
 а – concentration,  
 в – concentration by steam  
 Source: own development

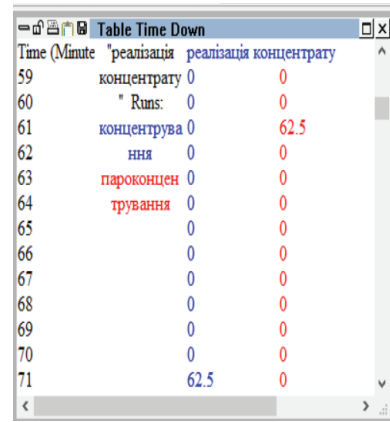


Рис. 10. Значення реалізації концентрату (кг):  
 а – концентрування,  
 б – пароконцентрування  
 Джерело: власна розробка

Fig. 10. Concentration value (kg)  
 а – concentration,  
 в – concentration by steam  
 Source: own development

Характер та значення продуктивності наведено на рис. 11 та 12.

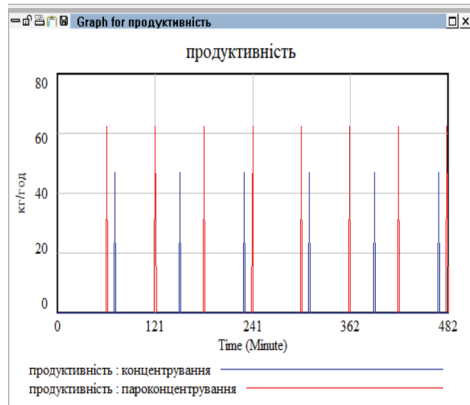


Рис. 11. Характер продуктивності (кг/год):  
 а – концентрування,  
 б – пароконцентрування  
 Джерело: власна розробка

Fig. 11. The nature of the productivity (kg/hour):  
 а – concentration,  
 в – concentration by steam  
 Source: own development

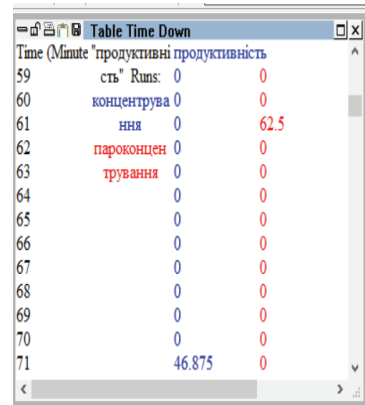


Рис. 12. Значення продуктивності (кг/год):  
 а – концентрування,  
 б – пароконцентрування  
 Джерело: власна розробка

Fig. 12. The value of productivity (kg/hour):  
 а – concentration,  
 в – concentration by steam  
 Source: own development

Таким чином, продуктивність пароконцентрування вище, ніж концентрування у  $62.5 / 46.875 = 1,33$  разів, тобто на 33 %.

### Висновки та обговорення результатів

У результаті проведеної роботи визначено залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів мішалки в процесі концентрування овочевого соку, що доводить ефективність використання розробленого пристрою для перемішування та нагрівання в'язких середовищ. Це сприяє скороченню тривалості переробки і, як наслідок, підвищенню якості готового продукту. Створена системно-динамічна модель кінетики температури в вакуум-випарному апараті, що робить можливим подальше комп'ютерне експериментування на підґрунті визначених практичним дослідженням зв'язків складної системи теплообміну. Розроблена імітаційна модель процесу уварювання при постійному перемішуванні під вакуумом, яка вказує на зростання продуктивності на 33 % за рахунок зменшення часу виходу на стаціонарний режим завдяки збільшенню площі нагріву апарату.

Аналіз результатів фізичного та імітаційного моделювання доводять перспективність використання засобів системного аналізу для дослідження процесів харчової технології.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

---

- Мамонтов, М.В. (2009). *Разработка и исследование сушки тонко измельченной моркови при комплексной ее переработке*. (Диссертация кандидата технических наук). Воронежская государственная технологическая академия, Воронеж.
- Меркулова, Т. В., Биткова, Т.В., & Кононова, Е.Ю. (2011). *Экономико-математическое моделирование* (2-е издание) Харьков: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина.
- Осецький, А.І., Гольцев, А.М., & Севастьянов, С.С. (2019). Сушіння біологічної сировини в режимі криосублимаційного фракціонування. В *Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини*, VI Всеукраїнська науково-практична конференція (с. 29-31). Харків.
- Панфилов, В.А. (Ред.). (2001). *Машины и аппараты пищевых производств*. Москва: Высшая школа.
- Петрова, Ж.А. (2010). Сохранность каротиноидов в зависимости от методов и режимов сушки. В *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету* (Вип. 42, т. 2: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави», с. 70-77). Вінниця.
- Потапов, В.О., Костенко, С.М., & Педорич, І.П. (2018). Імітаційне моделювання процесів та апаратів інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*, 35, 71-77.
- Промтов, М.А. (2004). *Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества*. Москва: Машиностроение-1.
- Сафонова, О.Н., Перцевой, Ф.В., Гринченко, О.А., Фощан, А.Л., Пивоваров, П.П., Богомолов, А.В. ... Гарнцарек, Б.Ч. (2000). *Системные исследования технологий переработки продуктов питания*. Харьков.

- Potapov, V., & Kostenko, S. (2016). "System-dynamic Modeling of Complex Assessment of ARJM-0.07-1 Apparatus". *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 2(24), 218-225.
- Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Sabadash, S. ... Peniov, O. (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.

## REFERENCES

---

- Mamontov, M.V. (2009). *Razrabotka i issledovanie sushki tonko izmelchennoi morkovi pri kompleksnoi ee pererabotke [Development and research of drying finely chopped carrots in its complex processing]*. (Candidate's thesis). Voronezhskaia gosudarstvennaia tekhnologicheskaja akademiia, Voronezh [in Russian].
- Merkulova, T.V., Bitkova, T.V., & Kononova, E.Iu. (2011). *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie [Economic and mathematical modeling: a training manual]* (2nd ed.) Kharkov: Kharkovskii natsionalnyi universitet imeni V. N. Karazina [in Russian].
- Osetskiy, A.I., Holtsev, A.M., & Sevastianov, S.S. (2019). Sushinnia biolohichnoi syrovyny v rezhymy kriosublimatsiinoho fraktsionuvannia [Drying of biological raw materials in the mode of cryo sublimation fractionation]. In *Problemy enerhoefektivnosti ta yakosti v protsesakh sushinnia kharchovoi syrovyny [Problems of energy efficiency and quality in the drying of food raw materials]*, Proceedings of the VI All-Ukrainian Conference (pp. 29-31). Kharkiv [in Ukrainian].
- Panfilov, V.A. (Red.). (2001). *Mashiny i apparaty pishchevykh proizvodstv [Machines and equipment for food production]*. Moscow: Vysshiaia shkola [in Russian].
- Petrova, Zh.A. (2010). Sokhrannost karotinoidov v zavisimosti ot metodov i rezhimov sushki [Preservation of carotenoids depending on drying methods and modes]. In *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho derzhavnogo ahrarnoho universytetu* (Issue 42, Vol. 2: Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Zemlia Ukrainy – potentsial enerhetychnoi ta ekolohichnoi bezpeky derzhavy", pp. 70-77). Vinnytsia [in Russian].
- Potapov, V., & Kostenko, S. (2016). "System-dynamic Modeling of Complex Assessment of ARJM-0.07-1 Apparatus". *Prohresyvni tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli*, 2(24), 218-225 [in English].
- Potapov, V.O., Kostenko, S.M., & Pedorych, I.P. (2018). Imitatsiine modeliuвання protsesiv ta aparativ infrachervonoho zharennia m'iasnykh napivfabrykativ [Simulation modeling of processes and devices of infrared frying of meat products]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*, 35, 71-77 [in Ukrainian].
- Promtov, M.A. (2004). *Mashiny i apparaty s impulsnymi energeticheskimi vozdeistviiami na obrabatyvaemye veshchestva [Machines and apparatus with pulsed energy effects on processed substances]*. Moscow: Mashinostroenie-1 [in Russian].
- Safonova, O.N., Pertcevoi, F.V., Grinchenko, O.A., Foshchan, A.L., Pivovarov, P.P., Bogomolov, A.V. ...Garntcarek, B.Ch. (2000). *Sistemnye issledovaniia tekhnologii pererabotki produktov pitaniia [System studies of food processing technologies]*. Kharkov [in Russian].
- Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Sabadash, S. ... Peniov, O. (2018). Universal multifunctional device for heat and mass exchange processes during organic raw material processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, 1 (96), 47-54 [in English].

УДК 663.81:66.021.4

**Александр Черевко,**  
доктор технических наук, профессор,  
Харьковский государственный университет  
питания и торговли,  
Харьков, Украина,  
otayak777@gmail.com  
<http://orcid.org/0000-0001-6047-8186>

**Ольга Маяк,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Харьковский государственный университет  
питания и торговли,  
Харьков, Украина,  
otayak777@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3059-4589>

**Станислав Костенко,**  
старший преподаватель,  
Харьковский государственный университет  
питания и торговли,  
Харьков, Украина,  
dlyastasa@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-0268-8008>

**Азиз Сардаров,**  
аспирант,  
Харьковский государственный университет  
питания и торговли,  
Харьков, Украина,  
otayak777@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0973-8197>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ УВАРИВАНИЯ ОВОЩНОГО СОКА

**Целью исследования** является совершенствование теплообменного оборудования для производства концентратов из овощного сырья, а именно вакуум-выпарного аппарата с перемешивающим устройством Инструментом для определения преимуществ предлагаемых технических решений избран системный анализ, а именно имитационное моделирование. **Методы исследования.** Основным теплообменным процессом разработанного способа производства концентрированных продуктов из овощного сырья является уваривания сока в вакуум-выпарном аппарате периодического действия с усовершенствованной конструкцией паровой мешалки. Мешалка представляет собой спиральную металлическую трубчатую конструкцию с возможностью подведения в ее полость пара. В результате проведенных экспериментов было исследована зависимость коэффициента теплоотдачи от числа оборотов разработанной мешалки, анализ которой позволил определить эффективность использования новой конструкции. Это стало практическим основанием системно-динамического моделирования изменения температурного поля во время уваривания овощного сока. **Результаты.** Предложен новый способ переработки овощного сырья. Для его реализации разработан вакуум-выпарной аппарат с усовершенствованным перемешивающим устройством. Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента теплоотдачи при концентрирования сока. Проведено имитационное моделирование изменений температурного поля в аппарате и общего ра-

бочего цикла выпарного аппарата. Результаты имитационного моделирования получены с использованием программного комплекса системного анализа Vensim. Продолжительность реального выхода на стационарный режим нагрева контролировалась экспериментально при использовании вакуум-выпарного аппарата. **Выводы и обсуждение.** Определена зависимость коэффициента теплоотдачи от числа оборотов мешалки во время уваривания овощного сока в усовершенствованном вакуум-выпарном аппарате. Создана системно-динамическая модель процесса теплоотдачи, а именно определены изменения температурного поля в аппарате, что делает возможным дальнейшее компьютерное экспериментирование на основе определенных практически исследованием связей сложной системы теплообмена.

**Ключевые слова:** концентрированный сок, вакуум-выпарной аппарат, температурное поле, перемешивающее устройство, теплоотдача, имитационное моделирование, системный анализ.

UDC 663.81:66.021.4

**Oleksandr Cherevko,**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Kharkiv State University of Food Technology and  
Trade,  
Kharkiv, Ukraine,  
omayak777@gmail.com  
<http://orcid.org/0000-0001-6047-8186>*

**Olga Mayak,**

*PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Kharkiv State University of Food Technology and  
Trade,  
Kharkiv, Ukraine,  
omayak777@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3059-4589>*

**Stanislav Kostenko,**

*Assistant of professor,  
Kharkiv State University of Food Technology and  
Trade,  
Kharkiv, Ukraine,  
dlyastasa@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-0268-8008>*

**Aziz Sardarov,**

*Graduate student,  
Kharkiv State University of Food Technology and  
Trade,  
Kharkiv, Ukraine,  
omayak777@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0973-8197>*

## RESEARCH OF HEAT EXCHANGE IN THE CONCENTRATION OF VEGETABLE JUICE

**The purpose of the article** is to improve the heat transfer equipment for the production of concentrates from vegetable raw materials, namely a vacuum-evaporator apparatus with a mixing device. System analysis, namely simulation modeling, has been chosen as a tool to determine the

advantages of the proposed technical solutions. **Research methods.** The main heat exchange process of the proposed method for the production of concentrated products from vegetable raw materials is the boiling of the juice in a vacuum-evaporator apparatus of periodic action with an improved design of a steam mixer. The mixer is a spiral metal tubular constructure with the possibility of supplying steam into its cavity. As a result of the experiments the dependence of the heat transfer coefficient on the rotation frequency of the developed mixer was investigated, the analysis of which allowed to determine the efficiency of using the new design of the mixing device. This became a practical basis for system-dynamic modeling of temperature field changes during vegetable juice boiling. **Results.** A new method of processing of vegetable raw materials has been proposed. For its implementation, a vacuum-evaporator apparatus with advanced mixing device was developed. Experimental studies were conducted to determine the heat transfer coefficient during juice concentration. The simulation of changes in the temperature field in the apparatus and the overall working cycle of the evaporator are carried out. Simulation results were obtained using the Vensim system analysis software package. The duration of real steady-state heating was controlled experimentally with the use of a vacuum-evaporator apparatus. **Conclusions.** The dependence of the heat transfer coefficient on the number of revolutions of the stirrer during the boiling of vegetable juice in the developed vacuum-evaporator apparatus is determined. A system-dynamic model of the heat transfer process has been created, namely the changes in the temperature field in the apparatus are determined, and that makes it possible for further computer experimentation on the basis of the practical studies of the complex heat transfer system relations.

**Keywords:** concentrated juice, vacuum-evaporator apparatus, temperature field, mixing device, heat transfer, simulation modeling, system analysis.