

ASSESSMENT OF HEAT-MASS TRANSFER EQUIPMENT
BY SIMULATION MODELING

A. Cherevko, O. Mayak, S. Kostenko, A. Sardarov
Kharkiv State University of Food Technology and Trade

Key words:

*Concentrated juice
Temperature field
Mixing device
Heat transfer
Vacuum drying
Simulation
System analysis*

Article history:

Received 09.09.2019
Received in revised form
23.09.2019
Accepted 13.10.2019

Corresponding author:

O. Mayak
E-mail:
omayak777@gmail.com

ABSTRACT

The main heat exchange process of the proposed method for the production of concentrated products from vegetable raw materials is boiling in a vacuum evaporator of periodic action with an improved design of the steam mixer. The mixer is a spiral metal tubular with the ability to pile into its cavity.

The dependence of a heat transfer coefficient on the number of turns of the mixer, during the production of separate concentrates from vegetable raw materials has been determined.

The efficiency of using device with a simple and reliable construction for mixing and heating viscous food products has been proved. It helps also to reduce the length of the product processing and improve quality of the finished product due to better mixing and intensification of heat transfer process by using spiral metal tubular designs for the supply of coolant, which contributes to the increase of the contact area of the product with heating elements.

The scrapers are located on the helix in such a way that they block each other while driving. When rotating the mixer, the scrapers move near the surface of heat exchange wall of the apparatus, forming a screw surface, which facilitates the turbulence of the wall laminar layer of the product, which it prevents from sticking, eliminates stagnant zones, resulting in temperature equalization and uniform flow of the process.

As a result of the experiments, dependence of the heat transfer coefficient on the number of revolutions of the developed mixer was investigated, the analysis of which allowed to determine the efficiency of the use of a new design of the mixing device. This became a practical basis for systematic dynamic modeling of temperature field changes during the boiling of vegetable juice. The simulation results were obtained using Vensim system analysis software.

Duration of the actual exit to the stationary mode of heating was controlled experimentally by means of the vacuum evaporator. A simulation model of the drying process was developed, which showed that the performance of vibration vacuum drying is higher than the vibration drying by 1.67 times, by 67%, the use of vacuum during drying is advisable. Comparison of the results of physical and simulation modeling proves the prospect of the crystallization of system analysis tools for the study of heat exchange processes.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-8

ОЦІНКА ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ШЛЯХОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

О. І. Черевко, О. А. Маяк, С. М. Костенко, А. М. Сардаров
Харківський державний університет харчування та торгівлі

Основним теплообмінним процесом запропонованого способу виробництва концентрованих продуктів з овочевої сировини є уварювання соку у вакуум-випарному апараті періодичної дії з удосконаленою конструкцією парової мішалки та сушіння відокремлених вичавків у вакуумній вібраційній сушарці. Мішалка являє собою спіральну металеву трубчасту конструкцію з можливістю підведення в її порожнину пари.

У результаті проведених експериментів досліджено залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів розробленої мішалки, аналіз якої дав змогу визначити ефективність використання нової конструкції перемішувального пристрою. Шкрєбки розташовані на спіралі таким чином, що вони блокують один одного під час руху. При обертанні змішувача шкрєбки переміщуються, утворюючи гвинтову поверхню, що запобігає прилипанню виробу, усуває застійні зони, в результаті чого забезпечується температурне вирівнювання та рівномірний перебіг процесу.

У результаті експериментів досліджено залежність коефіцієнта тепловіддачі від кількості обертів розробленого змішувача, що дало змогу визначити ефективність використання нової конструкції змішувача. Це стало практичним підґрунтям системно-динамічного моделювання зміни температурного поля під час уварювання овочевого соку. Результати імітаційного моделювання отримано з використанням програмного комплексу системного аналізу Vensim. Тривалість реального виходу на стаціонарний режим нагрівання контролювалася експериментально за умови використання вакуум-випарного апарата.

Розроблено імітаційну модель процесу сушіння, яка показала, що продуктивність вібровакуумного сушіння вища, ніж віброосушіння у 1,67 раза, тобто на 67%, тож застосування вакуумування під час сушіння є доцільним. Результати фізичного та імітаційного моделювання доводять перспективність використання засобів системного аналізу для дослідження тепломасообмінних процесів.

Ключові слова: концентрований сік, температурне поле, перемішувальний пристрій, тепловіддача, вакуумне сушіння, імітаційне моделювання, системний аналіз.

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. Цим проблемам приділено увагу у [1; 2]. Крім того, існуюче обладнання часто не відповідає вимогам збереження біологічної цінності готової продукції. Відомо, що найбільш ефективним способом збереження, а іноді й збільшення біологічної активності сполук, що входять до складу вихідної сировини, є концентрування, зокрема уварювання та сушіння [3; 4].

Основними тепломасообмінними процесами запропонованого способу виробництва концентрованих продуктів з овочевої сировини є уварювання відділеного соку у вакуум-випарному апараті періодичної дії з удосконаленою конструкцією парової мішалки та сушіння вичавків в умовах вакуумування під дією вібрації.

Залежно від властивостей речовини та поставлених технологічних завдань у процесі уварювання в'язких середовищ у випарних апаратах використовуються різні конструкції пристроїв для перемішування. Складність концентрування соків із м'якоттю полягає в їхній значній в'язкості, яка в процесі концентрування швидко збільшується, що ускладнює випаровування вологи й призводить до значної зміни смаку й кольору концентрованих продуктів у результаті місцевого перегріву. Відомо, що для зниження в'язкості й збільшення плинності пюреподібної маси застосовувалася обробка пектолітичними ферментними препаратами, однак це спричиняло руйнування пектинових речовин і втрати гомогенної структури продукту.

Крім того, слід зазначити, що тепловіддача під час кипіння рідини є складним процесом. Тому при узагальненні експериментальних даних велика складність виникає під час одержання критеріїв подібності й встановлення критеріальних залежностей, які дадуть змогу описати та спрогнозувати процес [5; 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час виробництва концентратів з рослинної сировини для вирішення проблеми збереження корисних сполук важливе значення має процес вакуумного уварювання соку. Для його ефективного перемішування можна рекомендувати якірні й скребкові мішалки. Теплові розрахунки апаратів із перемішувальними пристроями для переробки високов'язких рідких продуктів є досить складними. Існують дослідження теплообміну у високов'язких рідинах із використанням мішалок без зміни агрегатного стану середовища [9; 10].

Відомі імітаційні моделі процесу тепломасообмінних процесів, зокрема інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів, які створюють системне підґрунтя для їх описання і, як наслідок, інтенсифікації та оптимізації [11; 12].

Мета статті: обґрунтування процесів і вдосконалення тепломасообмінного обладнання для виробництва концентратів з овочевої сировини, а саме: вакуум-випарного апарата з перемішуючим пристроєм і вакуумної вібраційної сушаки.

Матеріали і методи. Інструментом для визначення переваг запропонованих технічних рішень обрано системний аналіз, а саме імітаційне моделювання. Системний аналіз пов'язує й узагальнює всі засоби вдосконалення технологічного процесу, що дає змогу не тільки одержати кількісну оцінку, але й визначити шляхи впровадження його у виробництво [7]. Разом з розробкою прогресивних процесів харчової технології потрібно створювати імітаційні моделі. Імітаційне дослідження дає змогу поєднувати особливості експериментального підходу і специфіку використання засобів комп'ютерної підтримки, зокрема використання спеціалізованого програмного пакета Vensim, оптимізувати технологічний процес за обраними реакціями шляхом комп'ютерного експерименту зі зміною та комбінуванням значень критеріїв,

забезпечуючи якісний продукт [8]. 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, що відтворює задані зразки.

Викладення основних результатів дослідження. Для здійснення процесів вакуумного уварювання була розроблена нова конструкція пристрою для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів (рис. 1).

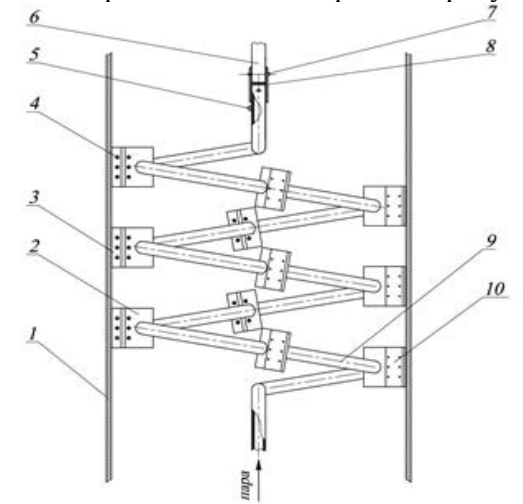


Рис. 1. Пристрій для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів:

- 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 — спіральна металева трубчаста конструкція для підведення пари

Скребки розміщені на спіралі таким чином, що під час руху перекривають один одного. Під час обертання мішалки скребки просуваються біля поверхні теплообмінної стінки апарата, 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 рухомої навколо вертикальної осі спіральної металевої трубчастої конструкції 9. З'єднання суцільної муфти 8 із валами здійснюється за допомогою штифтів 7. Під час обертання скребки рухаються, притискаючись до внутрішньої стінки робочої камери апарата 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 перемішувального пристрою всередину трубчастої конструкції. Щоб забезпечити належну швидкість нагрівання всієї конструкції, треба видалити повітря з перемішувального пристрою, для цього встановлений регульовальний патрубок для відведення повітря 5.

У результаті проведених досліджень процесу тепловіддачі з використанням пристроїв для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів отримано експериментальні дані, наведені на графіку залежності коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів мішалки (рис. 2).

Для порівняння ефективності використання нової мішалки паралельно на тій самій установці були проведені експерименти з визначення тепловіддачі з використанням якірної мішалки та шнекової скребкової мішалки конструкції ХДУХТ [9]. Вибір якірної мішалки пояснюється тим, що ця конструкція широко використовується в харчовій промисловості для перемішування в'язких середовищ.

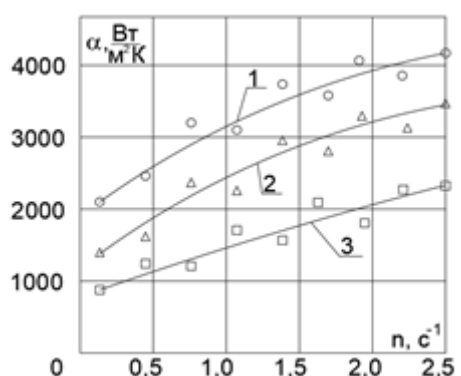


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тепловіддачі α (Вт/(м² К)) від числа обертів мішалки n (с⁻¹): 1 — пристрій для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів; 2 — шнекова скребкова мішалка конструкції ХДУХТ; 3 — якірна мішалка

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 α (Вт/(м² К)) для мішалки конструкції ХДУХТ на 20—30% 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 спіральної металеві трубочасті конструкції для підведення теплоносія, що сприяє збільшенню площі контакту продукту з нагрівальними елементами.

Коефіцієнти тепловіддачі в разі використання якірної мішалки на 40—50% менші, ніж в експериментальній мішалки. Це пояснюється тим, що руйнування структури харчової маси і, як наслідок, зменшення в'язкості неідеально-пластичної рідини, за тих самих чисел обертів значно менше під впливом якірної мішалки, ніж у разі застосування пристрою для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів.

Розглянуто динаміку зміни температурного поля під час уварювання морквяного соку. Результати системно-динамічного моделювання отримано з використанням програмного комплексу системного аналізу *Vensim*. На рис. 3 наведено імітаційну модель процесу уварювання морквяного соку. Для вери-

фікації результатів реальне уварювання здійснювалося у вакуум-випарному апараті.

Шляхом імітаційного моделювання визначено зміну температурного поля морквяного соку за умов перемішування з частотою 0,5, 1,5 та 2,5 с⁻¹, що забезпечує значення коефіцієнта тепловіддачі 4307, 10138 та 15306 Вт/м² К відповідно.

Екзогенні керовані змінні:

– геометричні компоненти (площа теплопередачі вала 5,7 м², площа теплопередачі оболонки — 16,8 м², об’єм продукту — 7,5 м³, товщина стінки, яка розділяє теплоносій та продукт — 0,003 м);

– теплофізичні компоненти (коефіцієнт тепловіддачі відповідно до частоти перемішування, коефіцієнт теплопровідності стінки — 380 Вт/(м² К), густина продукту — 988 кг/м³, питома теплоємність продукту — 4181 Дж/кг К);

– температурні компоненти (початкова температура продукту 20°C, температура теплоносія 106°C).

Ендогенні керовані змінні:

– площа теплообміну, що складається з площ теплопередачі валф та оболонки;

– відношення об’єму продукту до площі теплообміну.

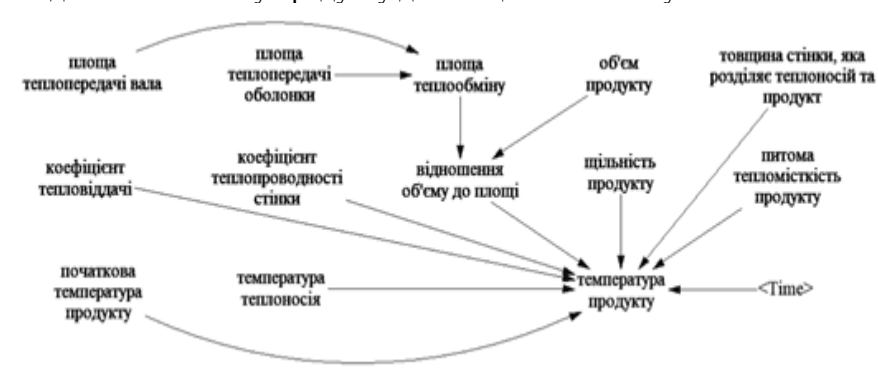


Рис. 3. Загальний вигляд моделі

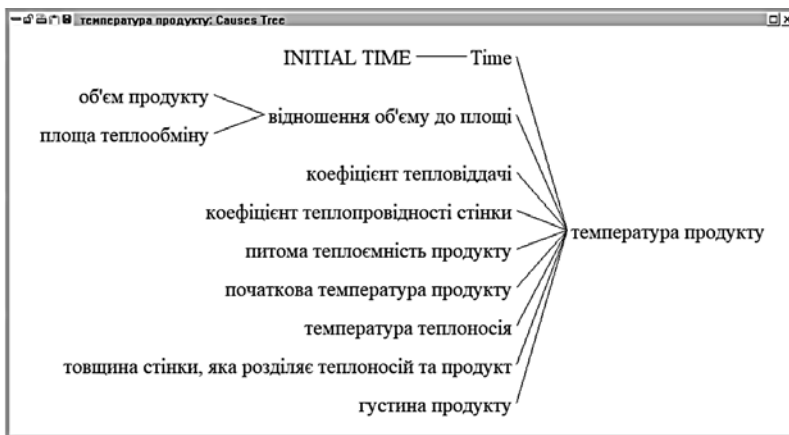


Рис. 4. Дерево причин функції відгуку — температури продукту

Модельним відгуком, або реакцією моделі є температура продукту. Усі чинники мають ефект взаємодії, тобто комбінованого впливу на реакцію моделі (рис. 4).

Графік температури продукту наведено на рис. 5.

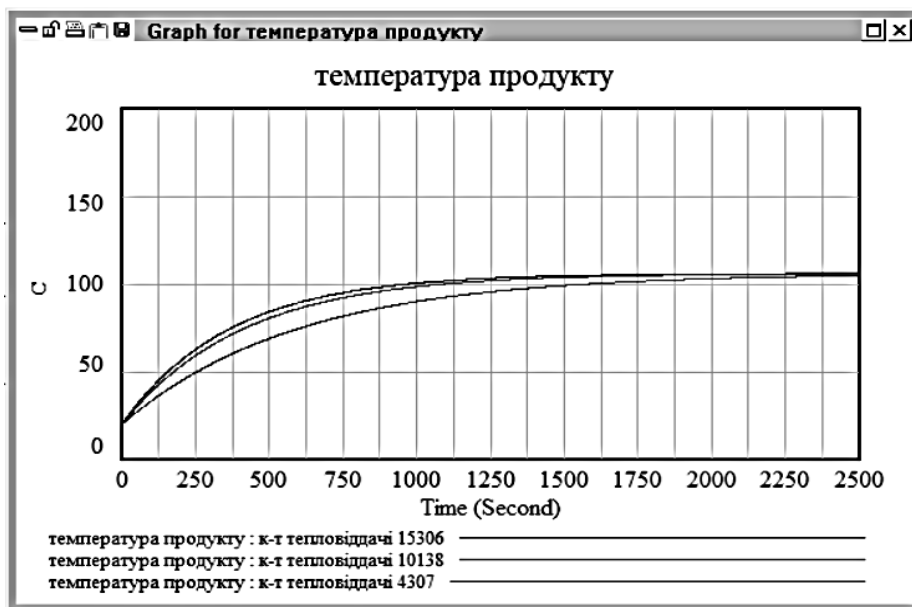


Рис. 5. Температура продукту за частоти обертання:

1 — 2,5 с⁻¹; 2 — 1,5 с⁻¹; 3 — 0,5 с⁻¹

Для забезпечення постійної безперервної переробки овочевих вичавок, а також для підвищення якості готових продуктів була розроблена вібраційна вакуумна сушарка безперервної дії (рис. 6).

Для здійснення процесу сушіння вичавок у розробленій вібраційній вакуумній сушарці безперервної дії треба аргументувати доцільне використання вакуумування для перебігу процесу. Для цього була розроблена імітаційна модель процесу сушіння овочевих вичавок, в основу були закладені результати обробки сировини двома видами сушіння: сушіння за умов атмосферного тиску під дією вібрацією, та сушіння під вакуумом під дією вібрації.

Інструментальною базою моделювання обрано системно-динамічну технологію потокового типу (програмний комплекс *Vensim*). Одиницею виміру часу в моделі є хвилина, що відповідає терміну найменшої затримки. Загальний вигляд моделі наведено на рис. 7.

Припущення: поставка вичавок є разовою пульсуючою; затримки на операціях відповідають рекомендаціям з експлуатації; терміни теплової обробки відповідають типовому обладнанню; втрати на операціях відповідають експериментальним дослідженням; залишок продукту відсутній; якість продукту незмінна.

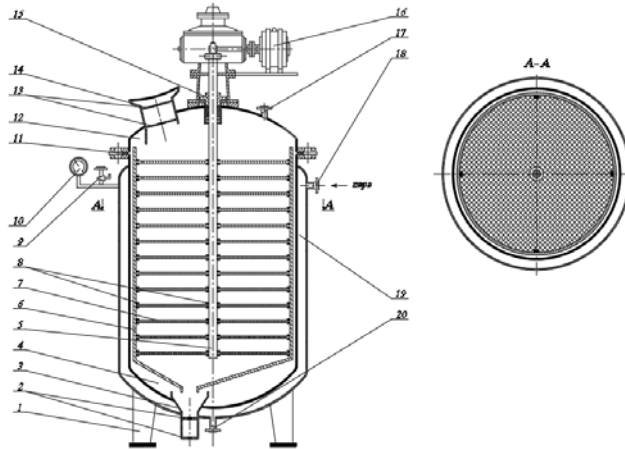


Рис 6. Вібраційна вакуумна сушарка безперервної дії для сушіння овочевої сировини: 1 — опори; 2 — запірний клапан; 3 — горловина; 4 — робоча камера; 5 — робочий вал; 6 — корпус для лотків; 7 — лотки для продукту; 8 — кріпильні елементи; 9 — клапан для видалення надлишкового повітря; 10 — манометр; 11 — затискач; 12 — кришка апарата; 13 — дозуючий клапан; 14 — завантажувальний бункер; 15 — ущільнювач для герметизації; 16 — віброгенератор; 17 — патрубок для видалення повітря; 18 — патрубок для подачі теплоносія; 19 — парова оболонка; 20 — патрубок для зливу теплоносія

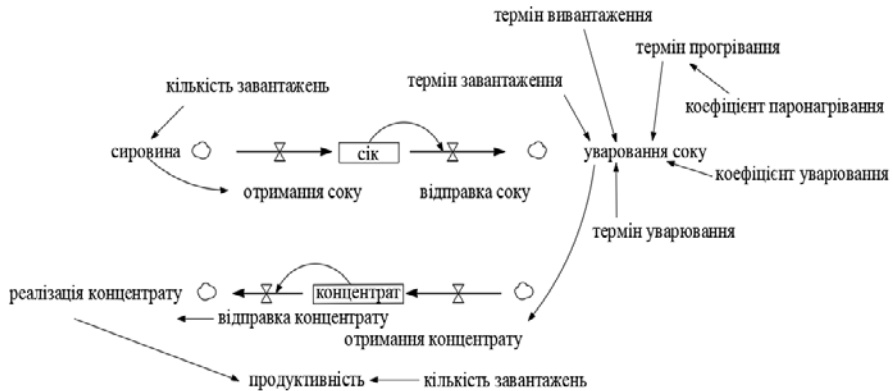


Рис. 7. Імітаційна модель процесу сушіння овочевих вичавок у вібраційній вакуумній сушарці безперервної дії

Екзогенні керовані змінні:

- масові компоненти (подрібнені вичавки);
- енергетичні компоненти (коefficient вакуумування, коefficient сушіння та періодичність завантаження);
- економічні компоненти (продуктивність).

Сушіння вичавок визначається множенням відправки вичавок на коефіцієнт сушіння із затримкою на періодичність завантаження. Модельним відгуком, або реакцією моделі було сушіння вичавок.

Усі фактори мають ефект взаємодії, тобто комбінованого впливу на реакцію моделі. Було використано такі рівні факторів:

- коефіцієнт сушіння дорівнює 0,775 кг/2,0 кг;
- періодичність завантаження становить 10 хв, помножені на коефіцієнт вакуумування;
- коефіцієнт вакуумування під час вібровакуумного сушіння становить 6 хв/10 хв, під час вібросушіння 10 хв/10 хв;

– продуктивність визначається множенням реалізації продукту на кількість завантажень за 1 годину та подальшим поділом на 1 годину;

Результати імітаційного моделювання процесу сушіння овочевих вичавок у вібраційній вакуумній сушарці безперервної дії представлені в таблиці.

Таблиця. Результати імітаційного моделювання процесу сушіння вичавок у вібраційній вакуумній сушарці безперервної дії

Характеристики	Сушіння у вакуумі з використанням вібрації	Сушіння при атмосферному тиску з використанням вібрації
Сировина, кг	2	2
Готовий продукт, кг	0,775	0,775
Періодичність завантаження, хв	10	10
Тривалість процесу, хв	60	100
Тривалість експерименту, хв	480	480
Кількість завантажень	10	6
Продуктивність, кг/год	3,875	2,325

Згідно з результатами імітаційного моделювання продуктивність сушіння у вакуумі з використанням вібрації вища на 60%, ніж сушіння при атмосферному тиску. Це зумовлено тим, що використання вакууму в масообмінних процесах сприяє збільшенню швидкості проходження процесу, за рахунок чого якість готового продукту максимально зберігається.

Висновки

У результаті проведеного дослідження визначено залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів мішалки під час уварювання овочевого соку, що доводить ефективність використання розробленого пристрою для перемішування та нагрівання в'язких середовищ, оскільки сприяє скороченню тривалості процесу переробки продукту та підвищенню якості готового продукту за рахунок більш якісного перемішування та інтенсифікації теплообміну. Створена системно-динамічна модель процесу тепловіддачі, зокрема визначення змін температурного поля в апараті, робить можливим подальше комп'ютерне експериментування на підґрунті визначених практичним дослідженням зв'язків складної системи теплообміну. Розроблена імітаційна модель процесу сушіння підтвердила, що продуктивність вібровакуумного сушіння вища, ніж вібросушіння у 1,67 раза, тобто на 67%, тож застосування вакуумування під час сушіння є доцільним.

Результатом дослідження є розробка установок для виробництва концентратів: вакуумного випарного апарата з пристроєм для нагрівання та перемішування, апарата для сушіння овочевої сировини під вакуумом під впливом вібраційного перемішування.

Література

1. Мамонтов М. В. Разработка и исследование сушки тонко измельченной моркови при комплексной ее переработке: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 Воронеж, 2009. 184 с.
2. Петрова Ж. А. Сохранность каротиноидов в зависимости от методов и режимов сушки. Збірник наукових праць ВНАУ «Земля України — потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави»: Київ, 2010. № 42. Т. 2. С. 70 — 77.
3. Осецький А. І., Гольцев А. М., Севастьянов С. С. Сушіння біологічної сировини в режимі кріосублимаційного фракціонування. *Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини*. VI Всеукр. науково-практ. конф. Харків, 2019. С. 29—31.
4. Zagorulko A., Zahorulko A., Kasabova K., Chervonyi V., Omelchenko O., Sabadash S., Zahorko N., Peniov O. Universal multifunctional device for heat and mass exchange processes during organic raw material processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, No 1 (96). Pp. 47—54.
5. Промтов М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества: учеб. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 136 с.
6. Панфилова В. А. Машины и аппараты пищевых производств. М.: Высшая школа, 2001. 1384 с.
7. Системные исследования технологий переработки продуктов питания / О. Н. Сафонова, Ф. В. Перцевой, О. А. Гринченко, А. Л. Фощан, П. П. Пивоваров, А. В. Богомолов, Л. Н. Тищенко, Б. Ч. Гарнцарек. Харьков: 2000. 200 с.
8. Меркулова Т. В., Биткова Т. В., Кононова Е. Ю. Экономико-математическое моделирование: учебное пособие [2-е изд., дораб.]. Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2011. 276 с.
9. Аббасов Н. М. Динамические модели теплообменников. *Химия и технология топлив и масел*. 2006. № 1. С. 20—22.
10. Туголуков Е. Н. Методика расчета нестационарных тепловых процессов в емкостных аппаратах. *Хим. пром-сть сегодня*. 2006. № 11. С. 44—46.
11. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Імітаційне моделювання процесів та апаратів інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів. *Вісник Національного технічного університету*. 2018. № 35. С. 71—77.
12. Potapov V., Kostenko S. System-dynamic Modeling of Complex Assessment of ARJM-0.07-1 Apparatus. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*: зб. наук. пр. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 2 (24). С. 218—225.