

## Секція 2. ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 621.3.036:664.87

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС УВАРЮВАННЯ ОВОЧЕВОГО СОКУ

**О.І. Черевко, О.А. Маяк, С.М. Костенко, А.М. Сардаров**

*Основним теплообмінним процесом запропонованого способу виробництва концентрованих продуктів з овочевої сировини є уварювання у вакуум-випарному апараті періодичної дії з удосконаленою конструкцією парової мішалки. Мішалка являє собою спіральну металеву трубчасту конструкцію з можливістю підведення в її порожнину пари. У результаті проведених експериментів було досліджено залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів розробленої мішалки, аналіз якої дозволить визначити ефективність використання нової конструкції перемішувального пристрою. 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. Результати фізичного та імітаційного моделювання доводять перспективність використання засобів системного аналізу для дослідження теплообмінних процесів.*

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

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ УВАРИВАНИИ ОВОЩНОГО СОКА

**А.И. Черевко, О.А. Маяк, С.Н. Костенко, А.М. Сардаров**

*Основным теплообменным процессом предложенного способа производства концентрированных продуктов на основе овощного сырья является уваривание сока в вакуум-випарном аппарате периодического действия с использованием усовершенствованной конструкции паровой*

мешалки. Мешалка представляет собой металлическую полую спираль с возможностью введения в ее полость пара. В результате проведенных экспериментов была исследована зависимость коэффициента теплоотдачи от числа оборотов разработанной мешалки, анализ которой позволил определить эффективность использования новой конструкции. Это стало практическим основанием для системно-динамического моделирования изменения температурного поля при уваривании овощного сока. Результаты имитационного моделирования получены с использованием программного комплекса системного анализа Vensim. Продолжительность реального выхода на стационарный режим нагрева контролировалась экспериментально с использованием вакуум-выпарного аппарата. Сравнение результатов физического и имитационного моделирования доказывает перспективность использования системного анализа для исследования теплообменных процессов.

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

## **EXPERIMENTAL AND SIMULATION MODELING OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS WHILE BOILING VEGETABLE JUICE**

**A. Cherevko, O. Mayak, S. Kostenko, A. Sardarov**

*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 design 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 is determined.*

*The efficiency of using a device with a simple and reliable construction for mixing and heating viscous food products is proved. Also it helps 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 turbulization 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 up 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. 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.*

**Keywords:** *concentrated juice, temperature field, mixing device, heat transfer, simulation, system analysis.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Залежно від властивостей речовини та поставлених технологічних завдань у процесі уварювання в'язких середовищ у випарних апаратах використовуються різні конструкції пристроїв для перемішування [1].

До сьогодні не вирішена проблема ефективного використання існуючих та розробки нових конструкцій перемішувальних пристроїв, які нададуть змогу найбільш ефективно сприяти виконанню поставлених технологічних завдань.

Складність концентрування соків із м'якоттю полягає в їхній значній в'язкості, яка в процесі концентрування швидко збільшується, що ускладнює випаровування вологи й веде до значної зміни смаку й кольору концентрованих продуктів у результаті місцевого перегріву. Відомо, що для зниження в'язкості й збільшення плинності пореподібної маси застосовувалася обробка пектолітичними ферментними препаратами, однак це призводило до руйнування пектинових речовин і втрати гомогенної структури продукту [2].

Крім того, налипання продукту на стінки апарата спричиняє пригорання продукту і, як наслідок, істотне погіршення його якості. Також після закінчення технологічного процесу високов'язкий харчовий продукт складно видалити з апарата, що збільшує витрати часу та електричної енергії на проведення процесу.

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 [3; 4].

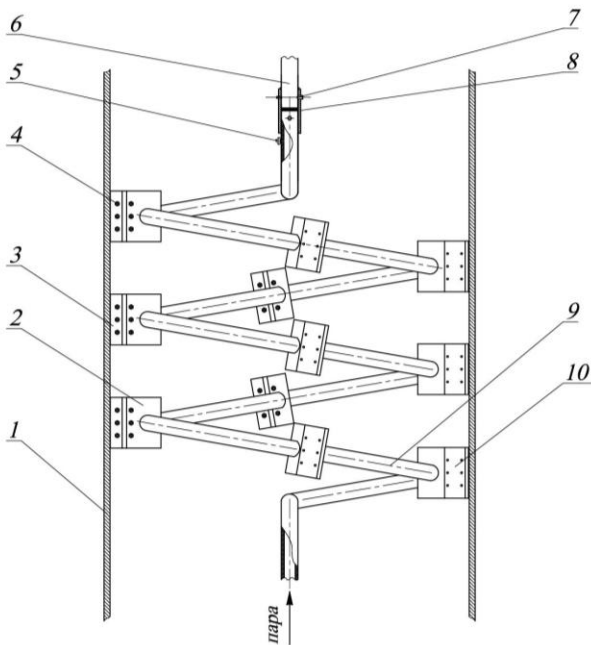
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час виробництва концентратів найважливіше значення має процес вакуумного уварювання соку. Для його ефективного перемішування можна рекомендувати якірні й скребкові мішалки. Теплові розрахунки апаратів із перемішувальними пристроями для переробки високов'язких рідких продуктів є досить

складними. Існують дослідження теплообміну у високов'язких рідинах із використанням мішалок без зміни агрегатного стану середовища [5; 7].

Відомі імітаційні моделі процесу тепло масообмінних процесів, а саме інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів, які надають системне підґрунтя для їх описання і, як наслідок, інтенсифікації та оптимізації [8].

**Мета статті** – дослідження залежності коефіцієнта тепловіддачі від числа обертів розробленої парової мішалки та створення імітаційної моделі динаміки зміни температурного поля під час процесу уварювання.

**Виклад основного матеріалу 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 патрубков 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).

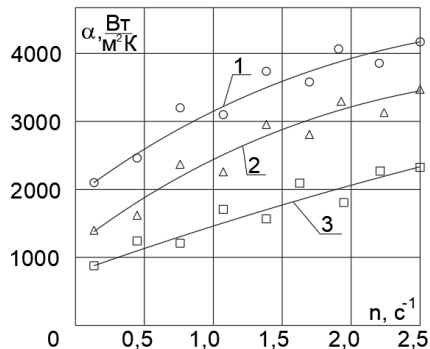


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  (Вт/м<sup>2</sup> К) від числа обертів мішалки  $n$  (с<sup>-1</sup>): 1 – пристрій для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів; 2 – шнекова скребкова мішалка конструкції ХДУХТ; 3 – якірна мішалка

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.

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  $\alpha$  (Вт/м<sup>2</sup> 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 трубною 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 неідеальнопластичної 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 верифікації 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<sup>-1</sup>, що забезпечує значення коефіцієнта тепловіддачі 4307, 10138 та 15306 Вт/м<sup>2</sup> К відповідно.

Екзогенні керовані змінні:

– геометричні компоненти (площа теплопередачі вала 5,7 м<sup>2</sup>, площа теплопередачі оболонки 16,8 м<sup>2</sup>, об'єм продукту 7,5 м<sup>3</sup>, товщина стінки, яка розділяє теплоносій та продукт 0,003 м);

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

– 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 валф та оболонки;

– відношення об'єму продукту до площі теплообміну.



Рис. 3. Загальний вигляд моделі

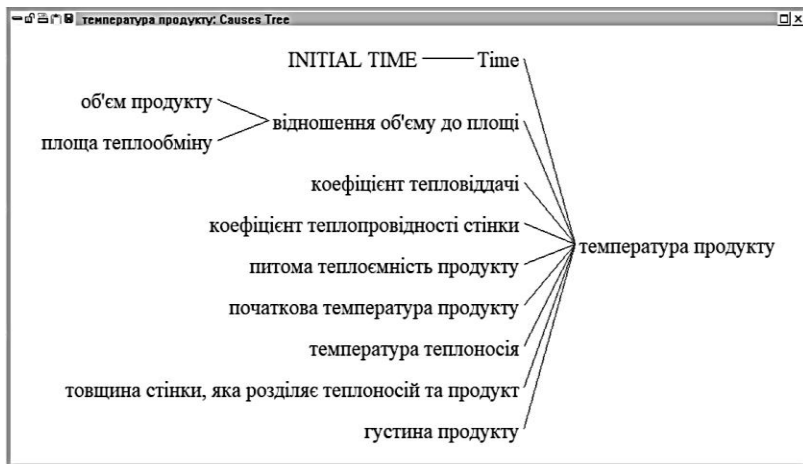
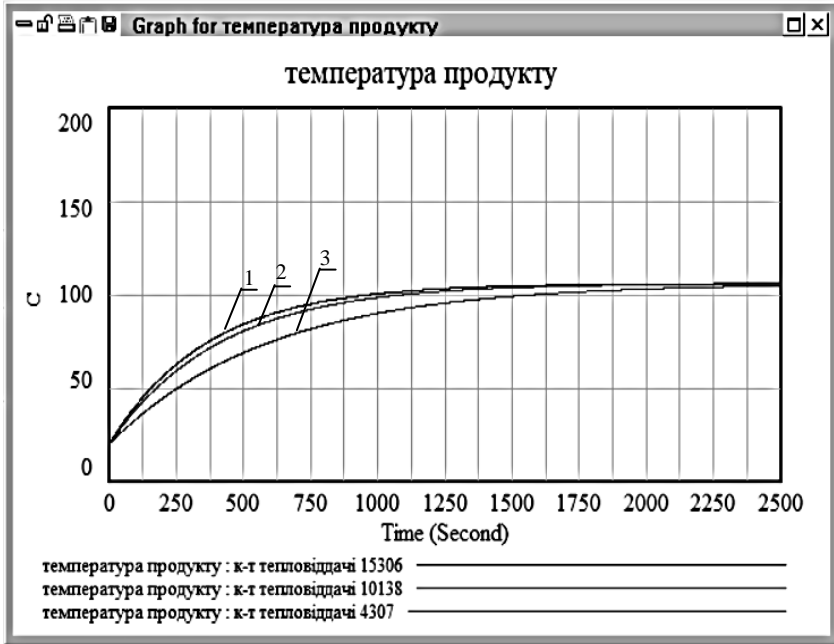


Рис. 4. Дерево причин функції відгуку – температури продукту

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<sup>-1</sup>; 2 – 1,5 с<sup>-1</sup>; 3 – 0,5 с<sup>-1</sup>

**Висновки.** У результаті проведеної роботи 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, що сприяє скороченню тривалості процесу переробки продукту та підвищенню якості готового продукту за рахунок більш якісного перемішування й інтенсифікації теплообміну. Створена системно-динамічна модель процесу тепловіддачі, а саме визначення змін температурного поля в апараті, робить можливим подальше комп'ютерне експериментування на підґрунті визначених практичним дослідженням зв'язків складної системи теплообміну.



### Список джерел інформації / References

1. Урьев Н. Б. Пищевые дисперсные системы / Н. Б. Урьев, М. А. Талейсник. – М. : Агропромиздат, 1985. – 296 с.  
Uriev, N. (1985), *Dispersed food systems [Pishevie dispersnie sistemi]*, Agropromizdat, Moscow, 296 p.
2. Самсонова А. Н. Фруктовые и овощные соки / А. Н. Самсонова, В. Б. Ушеба. – М. : Пищевая промышленность. 1976. – 275 с.  
Samsonova, A., Usheba, V. (1976), *Fruit and vegetable juices [Fruktovyye i ovoschnyye soki]*, Pischevaya promyshlennost, Moscow, 275 p.
3. Иванов Е. Л. Новые физические методы обработки пищевых продуктов. Лекция для студентов технологического факультета / Е. Л. Иванов. – Л., 1982. – С. 20–48.  
Ivanov, E. (1982), *New physical methods of food processing. The lecture for students of the faculty of technology [Novyye fizicheskiye metody obrabotki pischevyykh produktov. Lektsiya dlya studentov tehnologicheskogo fakulteta]*, Leningrad, pp. 20-48.
4. Промтов М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества : учеб. пособие / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 136 с.  
Promtov, M. (2004), *Machines and apparatus with pulsed energy effects on processed materials [Mashiny i apparaty s impulsnyimi energeticheskimi vozdeystviyami na obrabatyivaemye veschestva]*, Mashinostroenie-1, Moscow, 136 p.
5. Машины и аппараты пищевых производств / под ред. акад. Панфилова В. А. – М. : Высшая школа, 2001. – 1384 с.  
Panfilov, V. (2001), *Machines and apparatus of food production [Mashiny i apparaty pischevyykh proizvodstv]*, Vysshaya shkola, Moscow, 1384 p.
6. Аббасов Н. М. Динамические модели теплообменников / Н. М. Аббасов // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 1. – С. 20–22.  
Abbasov, N. (2006), “Dynamic models of heat exchangers” [“Dinamicheskiye modeli teploobmennikov”], *Himiya i tehnologiya topliv i masel*, No. 1, pp. 20-22.
7. Туголуков Е. Н. Методика расчета нестационарных тепловых процессов в емкостных аппаратах / Е. Н. Туголуков // Хим. пром-сть сегодня. – 2006. – № 11. – С. 44–46.  
Tugolukov, E. (2006), “Method of calculation of non-stationary thermal processes in capacitive apparatuses” [“Metodika rascheta nestatsionarnyykh teplovykh protsessov v emkostnykh apparatakh”], *Him. prom-st segodnya*, No. 11, pp. 44–46.
8. Потапов В. О. Імітаційне моделювання процесів та апаратів інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів / В. О. Потапов, С. М. Костенко, І. П. Педорич // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2018. – № 35. – С. 71–77.  
Potapov, V. (2018), “Simulation modeling of processes and apparatuses for infrared frying of meat semi-finished products” [“Imitatsiyne modelyuvannya procesiv ta aparativ infrachervonogo garennya myasnykh napivfabricativ”], *Visnik Nacionalnogo tehnicznego univesitetu HPI*, No. 35, pp. 71-75.

9. Пат. 24105 Україна, МПК А21С 1/00. Пристрій для перемішування в'язких харчових продуктів / Маяк В. І., Михайлов В. М., Смілик М. М. – № 200611832; заявл. 10.11.2006; публ. 25.06.2007, Бюл. № 9.

Mayak, V.I., Михайлов, V.M., Smilik, M.M., (2007), *Device for mixing viscous food products [Prystriy dlia peremishuvannia v'yazkyih harchovyih produktiv]*, Ukraine. Pat. 24105.

**Черевко Олександр Іванович**, д-р техн. наук, проф., кафедра процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051.

**Черевко Александр Иванович**, д-р техн. наук, проф., кафедра процессов, аппаратов и автоматизации пищевых производств, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051.

**Cherevko Aleksandr**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Processes, Apparatus and Automation of Food Productions, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051.

**Маяк Ольга Анатоліївна**, канд. техн. наук, доц., кафедра процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. E-mail: omayak777@gmail.com.

**Маяк Ольга Анатольевна**, канд. техн. наук, доц., кафедра процессов, аппаратов и автоматизации пищевых производств, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. E-mail: omayak777@gmail.com.

**Mayak Olga**, PhD in Technical Sciences (comparable to the academic degree of Doctor of Philosophy, PhD), Professor, Department of Processes, Apparatus and Automation of Food Productions, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. E-mail: omayak777@gmail.com.

**Костенко Станіслав Миколайович**, ст. викл., кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торгівельної галузей, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. E-mail: dlyastasa@gmail.com.

**Костенко Станислав Николаевич**, ст. преп., кафедра подготовки и переподготовки специалистов холодильной и торговой отраслей, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. E-mail: dlyastasa@gmail.com.

**Kostenko Stanislav**, Assistant of Professor, Department of Training and Retraining of Specialists in the Refrigeration and Trading Industries, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. E-mail: dlyastasa@gmail.com.

**Сардаров Азіз Мурадович**, асп., кафедра процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051.

**Сардаров Азиз Мурадович**, асп., кафедра процессов, аппаратов и автоматизации пищевых производств, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051.

**Sardarov Aziz**, Graduate Student, Department of Processes, Apparatus and Automation of Food Productions, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051.

DOI: 10.5281/zenodo.3263532

УДК 635.076.001.73

## **АНАЛІТИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПЛОДОВО-ЯГДНОЇ СИРОВИНИ**

**Г.В. Дейниченко, В.В. Гузенко, Д.В. Дмитревський,  
В.В. Перекрест, К.М. Рівний**

*Надано аналіз існуючих технологій переробки плодово-овочевої сировини. Розглянуто питання щодо впровадження оптимальних безвідходних технологій у сферу переробки плодово-овочевої сировини. Надано характеристику різних схем безвідходної переробки плодово-овочевої сировини. Запропоновано способи вдосконалення процесів та обладнання з метою розробки енергозбережної технології переробки плодово-овочевої сировини. Визначено переваги запропонованих способів безвідходної переробки плодово-овочевої сировини.*

**Ключові слова:** *плоди, ягоди, сировина, технологія, переробка, процес.*