

<sup>1</sup> Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: sheyina@donnuet.edu.ua

**ОСОБЛИВОСТІ СУШІННЯ КАРТОПЛЯНОГО ПЮРЕ КОНДУКТИВНИМ СПОСОБОМ ТА В ПОЛІ ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ**

UDC 641.522.4.06

Sheyina A. V., PhD student<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky (Kryvyi Rih, Ukraine), e-mail: sheyina@donnuet.edu.ua

**DRYING FEATURES OF MASHED POTATOES BY THE CONDUCTIVE METHOD AND IN THE FIELD OF INFRARED RADIATION**

*Мета статті* — на основі теоретичних та власних експериментальних досліджень визначити раціональний спосіб отримання сушених овочевих сумішей шляхом порівняльного аналізу конвективного, кондуктивного та радіаційного способів сушіння дисперсних систем.

*Методи.* Сушіння картопляного пюре виконувалося кондуктивним способом на спеціально розробленому експериментальному стенді. Відварений продукт наносився на розігріту до температури 100–120 °С поверхню та висушувався до стабілізації вологи. Під час досліджень вимірювалася температура контактної поверхні та шарів продукту, визначалися тривалість сушіння та кількість випареної вологи. Товщина досліджуваного шару становила до 3 мм. Сушіння в полі ІЧ-випромінювання виконувалося за допомогою професійного устаткування. Довжина хвилі ІЧ-випромінювача складала 1,6 мкм. Дослідження проводилися для шару сировини до 10 мм.

*Результати.* За результатами проведених досліджень отримано криві кінетики сушіння та криві прогрівання шарів продукту в часі. Експериментально визначено тривалість сушіння залежно від товщини шару та температури нагрівальної поверхні. При конвективному способі сушіння найліпший результат отримано за температури сушильної поверхні 120 °С. Тривалість сушіння складає 80 с для шару продукту товщиною 1,5 мм та 220 с — для шару товщиною 3 мм. Збільшення товщини шару сировини сприяє зростанню витрат на сушіння і є недоцільним за кондуктивного способу сушки. Використання ІЧ-випромінювачів надає можливість ефективно висушувати більші шари картопляного пюре. Отримані дані дозволяють обґрунтувати раціональність використання обох методів.

*Ключові слова:* кондуктивна сушка, кінетика, криві сушки, ІЧ-випромінювання, картопляне пюре.

**Постановка проблеми.** Разом із розвитком виробництва сушених овочів і фруктів у вигляді шматочків отримала розвиток переробка овочів і плодів у напівфабрикати високого ступеня готовності — сушені суміші. Ці продукти випускають переважно у вигляді порошків або пластівців. Розвиток виробництва овочевих, плодових і ягідних порошків відбувався паралельно розширенню асортименту харчових концентратів для дієтичного і дитячого харчування. Цьому сприяють зручність їх змішування з іншими компонентами, низький вміст вологи, швидкість відновлення та зручність використання порошків, їх невелика об'ємна маса і, відповідно, менша потреба у тарі, транспортних засобах тощо.

Широке використання напівфабрикатів високого ступеня готовності обумовлює їх підвищений попит і відповідні вимоги до якості. У зв'язку з цим виникає необхідність виробництва і розширення асортименту цієї продукції, а також удосконалення технології виробництва і розроблення нових методів і режимів обробки, що забезпечили б високу якість готового продукту, механізацію і значну інтенсифікацію виробництва.

Існує багато способів сушіння харчової сировини, але всі вони мають особливості застосування відповідно до поставлених завдань сушіння, властивостей самого продукту, його подальшого використання, продуктивності виробництва тощо. Відповідно, ці способи відрізняються кінетикою процесу, технологією і конструктивним виконанням обладнання. Розуміння особливостей різних способів сушки та властивих їм закономірностей дозволить визначити раціональні параметри процесу та надасть можливість обґрунтувати його доцільність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Великим попитом користуються овочеві пюре швидкого приготування, зокрема картопляне. Найбільш розповсюджені сушені форми картопляного пюре — у вигляді крупки або пластівців.

Технологія виготовлення картопляного пюре така: бульбоплоди миють, очищують від шкірки, подрібнюють, відварюють до готовності і далі висушують до відповідного рівня відносної вологості. До сушеної суміші додаються інгредієнти за рецептурою: сіль, спеції, сушені зелень та інші сухі овочі. У технологічній лінії виготовлення картопляного пюре швидкого приготування найбільш енергоємним є процес сушіння.

Розрізняють декілька видів сушіння: конвективне, контактне (кондуктивне), радіаційне, сублимаційне, діелектричне. У виробництві сушених овочів найбільш поширені перші три види.

Конвективне сушіння характеризується тим, що надходження теплоти до поверхні висушуваного продукту відбувається за допомогою теплоносія. Зазвичай у такий спосіб висушують штучні овочі та фрукти у вигляді шматочків різної форми. У якості теплоносія використовують нагріте повітря. Перевагою такого способу є можливість регулювання параметрів сушіння, що дозволяє виконувати процес за оптимальних режимів та зберігати корисні компоненти сировини, отримувати кінцевий продукт високої якості. Недоліком конвективного способу сушки є його тривалість та енергоємність [1].

Різновидом конвективного сушіння є сушка методом розпилювання. У такому випадку картопляне пюре необхідно доводити до рідкого стану, адже метод розпилювання полягає у висушуванні продукту у вигляді дрібних крапельок під час їхнього контакту з потоком нагрітого повітря. Цей метод дозволяє значно інтенсифікувати процес сушки за рахунок максимального зменшення розмірів розпилювальних частинок. За таких умов утворюється велика поверхня теплообміну, що значно скорочує сушіння і надає можливість використовувати підвищені температури сушильного агента. Сушіння відбувається практично миттєво, забезпечується збереження корисних речовин. Частинки отриманого порошку можуть мати діаметр від 5 до 1000 мкм. Цей спосіб дуже перспективний, але є недолік, пов'язаний із ефектом «склеювання» картопляного пюре, який вимагає вирішення [2].

Альтернативою конвективному способу сушіння може бути контактна сушка, коли тепло, необхідне для нагрівання продукту і випаровування вологи, передається теплопровідністю від нагрітої поверхні. Цей спосіб досить ефективно використовується при сушінні в тонкому шарі поревидних та в'язких продуктів. У якості теплоносія використовується водяна пара, інколи — олія.

Перевага кондуктивного способу сушіння полягає у тому, що він не вимагає додаткових систем очищення теплоносія від пилу, утворюваного під час змішування з висушеним продуктом, на відміну від сушки розпилюванням. При цьому способі сушіння відсутній контакт продукту з теплоносієм [1].

Інноваційним в технології сушіння є використання ІЧ-нагрівачів. Слід зазначити, що овочева сировина, в тому числі і картопля, мають виражені оптичні властивості [7]. Зі збільшенням товщини шару овочів збільшується відображення ІЧ-променів, що пояснюється їх здатністю розсіювання, тому дослідження в цьому напрямку є актуальними. Сушінню в полі ІЧ-випромінювання приділяється багато уваги останніми роками, адже цей спосіб надає можливість значно скоротити тривалість обробки і тим самим підвищити продуктивність та енергоефективність виробництва [3; 4; 6–8].

Аналіз наукових праць та літературних джерел, присвячених сушінню овочевої та плодової сировини, дозволив встановити фактори, які впливають на процес сушіння: вид продукту, ступінь подрібнення (дисперсність), температура сушильного агенту, товщина висушуваного шару. Від цих параметрів залежить не лише швидкість сушки, але й критичний вологовміст продукту, технологічні властивості і якість.

**Метою статті** є аналіз впливу зазначених факторів на процес сушіння картопляного пюре різними методами.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Щоб визначити витрати теплоносія та енергоефективність процесу, необхідно враховувати особливості видалення вологи під час сушіння та знати кінетику процесу [3]. З цією метою була розроблена методика кондуктивного сушіння картопляного пюре, виготовленого за класичною рецептурою, спланований та поставлений експеримент.

Для проведення досліджень використовувалася експериментальна установка контактного типу, виконана у вигляді прямокутної ємності з харчової нержавіючої сталі, заповненої водою (парогенератор), усередині якої встановлено електронагрівач. Прямокутна верхня горизонтальна поверхня парогенератора виконує функцію нагрівальної поверхні, на якій розташовується тонким шаром досліджуваний продукт [2].

При вмиканні електронагрівача вода в парогенераторі закипає і пара заповнює вільний простір. За допомогою манометра регулюється тиск пароводяної суміші. При сталому режимі роботи тиск в парогенераторі досягає 0,5 атм., що відповідає температурі кипіння рідини 110–115°C. Пара віддає приховану теплоту пароутворення контактній поверхні, і, конденсуючись, повертається рідкий стан, при цьому відбувається інтенсивний процес теплообміну між паром і нагрівальною поверхнею. Поверхня контакту нагрівається і передає теплоту нанесеному на неї шару висушуваного продукту.

Під час експерименту здійснювалися вимірювання маси продукту до і після сушки з метою визначення кількості випареної вологи. Виконувалися заміри температури продукту на поверхні контакту з нагрівальною площиною та поверхневого шару, що контактує із зовнішнім повітрям. Температура в процесі дослідження визначалася за допомогою термопар, закріплених на контактній поверхні, електронного пірометра та портативного термощупа.

Сира очищена картопля відварювалася та подрібнювалася до пюреподібного стану. Перед нанесенням продукту на поверхню готувалися експериментальні зразки визначеної маси. Експеримент тривав до повного висихання продукту та стабілізації вологи, після чого з нагрівальної поверхні знімалася суха маса, зважувалася та подрібнювалася. Дослідження проводилися за температури поверхні контакту 90, 100, 110 та 120 °C. Товщина шару картопляного пюре становила 1,5 мм та 3 мм.

За результатами експериментальних досліджень побудовано графічні залежності прогрівання шару продукту (рис. 1) та криві кінетики сушки, які дозволяють аналізувати характер видалення вологи під час сушіння на різних етапах та тривалість процесу (рис. 2).

За температури поверхні 90–110 °C в тонкому шарі випаровування відбувається як на відкритій, так і на контактній поверхні матеріалу. За високої температури нагрівальної поверхні випаровування в основному відбувається в контактному шарі, причому настільки інтенсивно, що значно перевищує швидкість розсмоктування пари всередині матеріалу. Внаслідок цього в контактному шарі виникає градієнт загального тиску, який і є рушійною силою молярного перенесення пари до відкритої поверхні (рис. 1).

Експериментально встановлено, що механізм перенесення вологи залежить від товщини матеріалу. З відносно товстої плівки матеріалу випаровування відбувається в основному в зоні у відкритій поверхні. Волога рухається в цю зону з контактного шару у вигляді рідини. З тонкого шару матеріалу випаровування відбувається головним чином біля контактної поверхні. Міграція вологи всередині матеріалу здійснюється як у вигляді пари, так і у вигляді рідини.

На рис. 2 наведено криві кінетики сушки картопляного пюре за температури нагрівальної поверхні 90 °C.

Отримані залежності надають можливість аналізувати зміну вологості в продукті під час сушіння на різних етапах. Встановлено, що при товщині шару 1,5 мм тривалість про-

цесу становить 16 хв, при збільшенні товщини шару до 3 мм тривалість сушіння зростає до 27 хв.

На рис. 3 показано залежність тривалості сушіння від температури поверхні контакту при різних товщинах шару пюре.

Зі збільшенням шару швидкість сушіння знижується, а збільшення температури нагрівальної поверхні на 20 °С призводить до зменшення тривалості процесу майже в два рази. Відповідно до органолептичної оцінки якості [9] отриманого картопляного пюре, всі зразки мають високі показники. Збільшення температури понад 120 °С призводило до підгоряння контактного шару та погіршення смакових властивостей кінцевого продукту.

При сушінні картопляного пюре інноваційним і актуальним є використання

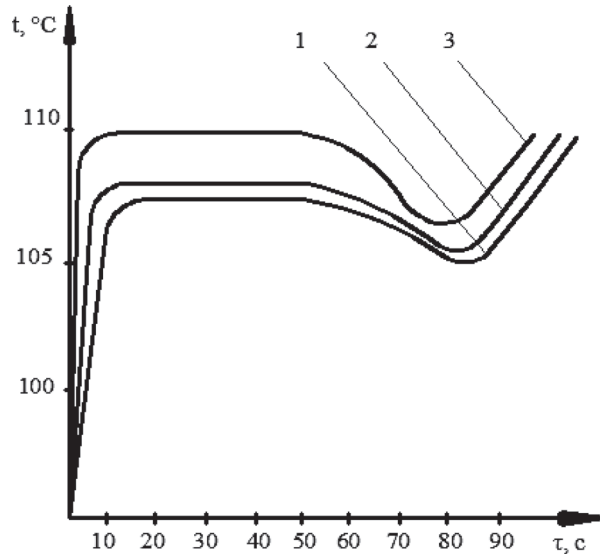


Рисунок 1 — Температурні криві шарів продукту: 1 — контактний шар, 2 — поверхневий шар при товщині 1,5 мм, 3 — поверхневий шар при товщині 3 мм

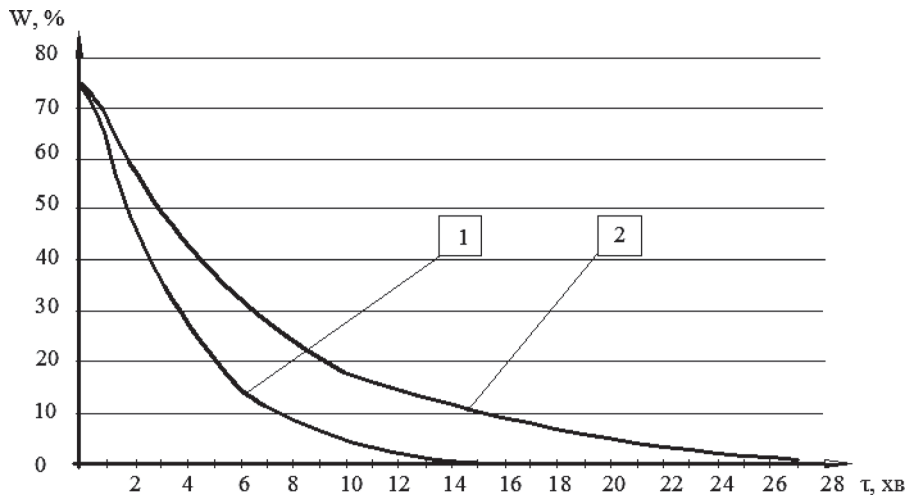


Рисунок 2 — Криві кінетики сушки: 1 — при  $h = 1,5$  мм, 2 — при  $h = 3$  мм

інфрачервоних променів, що дозволяє значно інтенсифікувати процеси внаслідок збільшення щільності теплового потоку на поверхні матеріалу і проникнення цих променів на деяку глибину.

Для сушіння овочів, картоплі, фруктів та багатьох інших вологих продуктів рекомендується зона спектра з довжиною хвилі 1,2–2,2 мкм за найбільш доцільної температури «сірого» джерела випромінювання 1530 °С ( $L_{max} = 1,6$  мкм) [5].

Криві сушіння картопляного пюре з використанням ІЧ-випромінювачів показано на рис. 4. Випробування здійснювали на модернізованій сушильній установці А1-ШКС. Дослідження проводилися при товщині шару картопляного пюре до 60 мм. Нагрівання картоплі здійснювалося в щільному шарі при ступінчастому опромі-

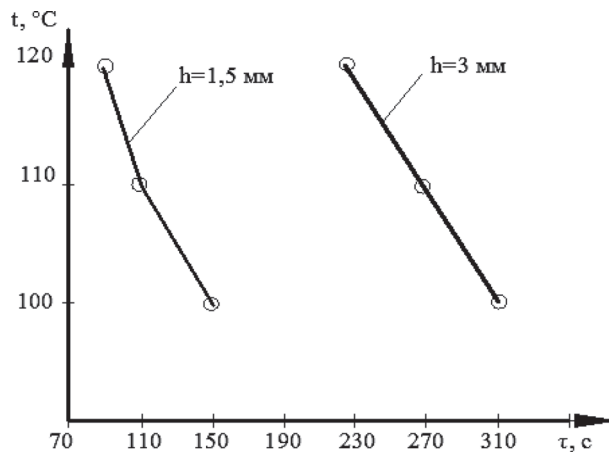


Рисунок 3 — Залежність тривалості обробки продукту від температури нагрівальної поверхні

ненні. Відстань від поверхні лампи до матеріалу, залежно від висоти шару, змінювалася в межах від 145 мм до 215 мм, що відповідає густині променевого потоку 2000 Вт/м<sup>2</sup>.

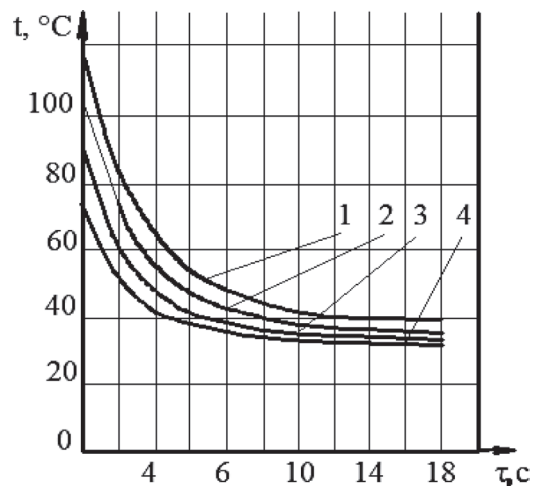
Згідно з графіками, нагрів продукту відбувається від поверхні всередину. Криві розподілу температур мають приблизно параболічний характер (рис. 4). При цьому спостерігається різке зростання температури в часі і поступове зменшення її зі збільшенням відстані частинок продукту від поверхні. У шарі товщиною понад 15 мм ступінь проникнення ІЧ-променів дуже незначна.

При переривчастому режимі опромінення [4; 5] нагрів матеріалу чергується з витримкою. Під час витримки температура поверхні матеріалу знижується. Це відбувається за рахунок того, що частина тепла передається навколишньому середовищу, а частина розповсюджується у непрогрітий шар. При цьому нагрів внутрішніх шарів матеріалу збільшується, а небезпека перегріву поверхневого шару зменшується.

Криві нагрівання шару картоплі завтовшки 20 і 60 мм свідчать про те, що проникнення ІЧ-випромінювання має місце на глибину 4–5 мм. Для частинок, розташованих на глибині 10–20 мм, зміна температури незначна, а в частинках, розташованих на поверхні шару, температура різко зростає. Через 2–10 хв. після включення лампи ІЧ-нагріву температура поверхневого шару матеріалу досягає значення вище гранично допустимого, починається підгоряння продукту, а потім і повне обвуглювання. Щоб не допускати подібного, необхідно витримувати раціональні режими сушіння.

**Висновки.** Аналіз різних способів сушіння та проведені власні дослідження дозволяють стверджувати, що кондуктивний спосіб доцільно використовувати при обробці продукту шаром товщиною не більше за 3 мм. При цьому збільшення температури сушки понад 100 °С дозволяє значно скоротити тривалість обробки, але цей показник може бути обмежений зміною органолептики сировини та втратою корисних поживних речовин внаслідок використання високих температур.

Альтернативою кондуктивній сушці може стати використання ІЧ-нагрівачів під час обробки. Згідно з результатами досліджень, це надасть можливість здійснювати сушіння шарів продукту товщиною до 15 мм, що сприятиме підвищенню продуктивності процесу та знизить його енергоємність.



**Рисунок 4** — Розподіл температур у шарі продукту залежно від тривалості обробки:  
1 — 18 хв.; 2 — 12 хв.; 3 — 9 хв.; 4 — 3 хв.

#### Список літератури/References

1. Naderinezhad, S., Etesami, N., Najafabady, A. P., Falavarjani, M. G. (2016). Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. *Food Science and Nutrition*, vol. 4 (1).

2. Поперечний А. М., Корнійчук В. Г., Шеїна А. В. Дослідження процесу сушіння картопляного пюре / А. М. Поперечний, // *Обладнання та технології харчових виробництв* : темат. зб. наук. праць. Донецьк : ДонНУЕТ, 2010. С. 50–56.

Poperechnyi, A. M., Korniyuchuk, V. G., Sheyina, A. V. (2010). *Doslidzhennia protsesu sushinnia kartoplianoho pyure* [Study of the process of drying mashed potatoes]. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv* [Equipment and technology of food production] Donetsk, DonNUET, pp. 50–56 (in Ukr.).

3. Ruhanian, S., Movagharnejad, K. (2016). Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin layer drying in an infrared convective dryer. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 9, no. 1, pp. 84–91.

4. Lin, Y., Tsen, J., King, V. (2015). Effects of farinfrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering*, vol. 68, pp. 249–255.

5. Желтоухова Е. Ю., Каданцев А. А., Яницкий В. И. Исследование радиационно-конвективной сушки картофеля при переменном теплоподводе // Вестник ВГУИТ. Т. 79. № 1. С. 46–49.

Zheltoukhova, E. Y., Kadantsev, A. A., Yanitskiy, V. I. (2017). *Issledovanie radiatsionno-konvektivnoy sushki kartofelya pri peremennom teplopodvode* [Investigation of radiation-convective drying of potato wafers with a variable heat supply]. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET], vol. 79, no. 1, pp. 46–49 (in Russ.).

6. Zhou, Z., Plauborg, F., Kristensen, K. (2017). Dry matter production, radiation interception and radiation use efficiency of potato in response to temperature and nitrogen application regimes. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 232, no. 15, pp. 595–605.

7. Nielsen, G. G. B., Kjær, A., Klösgen, B. (2016). Dielectric spectroscopy for evaluating dry matter content of potato tubers. *Journal of Food Engineering*, vol. 189, pp. 9–16.

8. Helgerud, T., Wold, J. P., Liland, K. H. (2015). Towards on-line prediction of dry matter content in whole unpeeled potatoes using nearinfrared spectroscopy. *Talanta*, T. 143, no. 1, pp. 138–144.

9. Маматов Ш. М., Додаев К. О. Исследование влияния предварительной обработки на качество высушенного картофеля / Ш. М. Маматов // Растительное сырье и продукты его переработки. Пищевая промышленность. 2015. № 8. С. 26–28.

Mamatov, S. M., Dodaev, K. O. (2015). *Issledovanie vliyaniya predvaritel'noy obrabotki na kachestvo visushenogo kartofelya* [Investigation of the effect of pretreatment on the quality of dried potatoes]. *Rastitel'noye syr'ye i produkty ego pererabotki. Pishchevaya promyshlennost'* [Vegetable raw materials and products of its processing. Food industry], no. 8, pp. 26–28 (in Russ.).

**Цель.** Цель статьи — на основании теоретических и собственных экспериментальных исследований определить рациональный способ изготовления сухих овощных смесей путем сравнительного анализа конвективного, кондуктивного и радиационного способов сушки дисперсных систем.

**Методы.** Сушка картофельного пюре осуществлялась кондуктивным способом на специально разработанном экспериментальном стенде. Отваренный продукт наносился на разогретую до температуры 90–120 °С поверхность и высушивался до стабилизации влаги. Во время исследований измерялась температура контактной поверхности и слоев продукта, определялись длительность сушки и количество выпаренной влаги. Толщина исследуемого слоя составляла до 3 мм. Сушка в поле ИК-излучения выполнялась с применением профессионального оборудования. Длина волны ИК-излучателя составляла 1,6 мкм. Исследования проводились для слоя материала толщиной до 15 мм.

**Результаты.** По результатам проведенных исследований получены кривые кинетики сушки и температурные кривые, отображающие нагрев слоев продукта во времени. Экспериментально определена длительность сушки в зависимости от толщины слоя и температуры греющей поверхности. При конвективном способе сушки наилучший результат получен при температуре греющей поверхности 120 °С. Продолжительность сушки составляет 80 с для слоя продукта толщиной 1,5 мм и 220 с — для слоя толщиной 3 мм. Увеличение толщины слоя картофельного пюре способствует росту расходов на сушку и является нецелесообразным для кондуктивного подвода тепла. Использование ИК-излучателей предоставляет возможность эффективно высушивать слои картофельного пюре толщиной до 15 мм. Полученные данные позволяют обосновать рациональность использования обоих методов.

**Ключевые слова:** кондуктивная сушка, кинетика, кривые сушки, ИК-излучение, картофельное пюре.

**Objective.** The objective of the article is on the basis of theoretical and own experimental studies, to determine a rational method of making dry vegetable mixtures by comparative analysis of convective, conductive and radiation methods of drying disperse systems.

**Methods.** Mashed potatoes were driven by a conductive method on a specially designed experimental stand. The boiled product was applied to a heated to 90–120 °C surface and dried to stabilize the moisture. During the studies, the temperature of the contact surface and the product layers was measured, the drying time and the amount of evaporated moisture were determined. The thickness of the investigated layer was up to 3 mm. Drying in the field of IR radiation was carried out using professional equipment. The wavelength of the infrared emitter was 1,6 microns. The research was conducted for a layer of raw material up to 10 mm.

**Results.** According to the results of the studies, the curves of the kinetics of drying and the temperature curves showing the heating of the product layers with time are obtained. The duration of drying is determined experimentally, depending on the thickness of the layer and the temperature of the heating surface. With a convective drying method, the best result is obtained at a heating surface temperature of 120 °C. The drying time is 80 s for a layer of product 1.5 mm thick and 220 s — for a layer of 3 mm thick. Increasing the thickness of the layer of mashed potatoes contributes to the growth of drying costs and is not suitable for conductive heat supply. The use of IR emitters provides the opportunity to effectively dry large layers of mashed potatoes. The data obtained justify the rationality of using both methods.

**Key words:** conductive drying, kinetics, drying curves, infrared radiation, mashed potatoes.