

УДК 664.162

КІНЕТИКА СУШІННЯ ПОДРІБНЕНИХ ПЛОДІВ ТОМАТІВ

Хомічак Л. М., д.т.н., проф., член-кор. НААН,
зав. відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів,

Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ
ORCID ID:0000-0001-9003-0315

Петрова Ж. О., д.т.н., с.н.с.,
гол.н.с. відділу тепломасопереносу в тепло технологіях,
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

ORCID ID: 0000-0001-7385-8435

Кузнєцова І. В., д.с.-г.н., с.н.с.,
заст. академіка-секретаря відділення рослинництва,
Національна академія аграрних наук України, м. Київ

ORCID ID:0000-0001-8530-2099

Ярмолюк М. А., аспірант, м.н.с.,
відділ технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів,
Інститут продовольчих ресурсів НААН, м. Київ

ORCID ID:0000-0002-0315-9418

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-12-17>

Інтенсивний розвиток селекційної роботи зі створення нових перспективних сортів томатів та впровадження сучасних технологій їх вирощування обумовлює актуальність розроблення нових ресурсощадних технологій їх переробки на харчові цілі. Зазначені технології, насамперед сушіння, дають змогу налагодити переробку великих обсягів некондиційних томатів, що наразі не знаходять попиту серед споживачів. В умовах розвитку селекційних і технологічних процесів зі створення нових перспективних сортів томатів набуває розвитку й технологічні основи переробки їх плодів на харчові продукти. Налагодження переробки плодів томатів сприяє використанню в харчовій промисловості некондиційних плодів, які не знаходячи попиту в споживача і залишаються в полі. Прогрес в цьому напрямі неможливий без поглиблення наукових уявлень щодо динаміки та енергетики зневоднення рослинної сировини. Метою роботи є вивчення кінетичних особливостей процесу сушіння плодів томатів для отримання конкурентоспроможної продукції. Матеріали і методи досліджень. Використовували плоди томатів-сливок сорт Попільнянський і гібрид Миколка, що вирощені в підзоні недостатнього зволоження на дослідних ділянках станції Інституту овочівництва і багтанництва НААН (п/в Борова, Фастівський р-н. Київська обл.). Кінетику сушіння вивчали на експериментальному стенді конвективної сушарки в Інституті технічної теплофізики НАН України. Для цього плоди томатів-сливок мили, нарізали розміром 5x5x5 мм і сушили. Режимні параметри сушіння: температура теплоносія (повітря) $t = 60^{\circ}\text{C}$, швидкість теплоносія $v = 2,5$ м/с, вологовміст $d = 10$ г/кг с.п., товщина шару 15 мм. Результати досліджень. Рослинні тканини належать до колоїдних капілярно-пористих тіл, які, залежно від виду та умов вегетації, містять від 20 до 95% води. Кінетика подрібнених плодів в сушарці показує перспективність використання конвективного сушіння впродовж 295 хв. Отримана кінетична залежність показує переважний вплив вологовмісту на тривалість процесу і має кореляційний зв'язок 0,9701. Показано, що вологовміст сушильного агенту найбільше впливає на інтенсивність швидкості сушіння на її початковій стадії. Величина достовірності апроксимації експериментальних даних при цьому становить 0,995. Процес сушіння характерно проходить в три етапи і за

коефіцієнтом внутрішньої дифузії має лінійну функцію. Апроксимація експериментальних даних лінійною функцією показує послаблення рівня переходу вологи в подрібнених частках плоду томату до їх поверхні і значення кореляційного зв'язку становить 0,7079. Представлено кінетичне рівняння для визначення граничного вологовмісту у подрібнених плодах томатів-сливок. Висновки Доведено, що конвективне сушіння подрібнених плодів томатів є одним з перспективних способів отримання томат-продуктів. Вивчено технологічні умови конвективного сушіння та визначено оптимальний режим: розмір – 5x5x5 мм, товщина шару 15 мм, температура теплоносія (повітря) $t = 60^{\circ}\text{C}$, швидкість теплоносія $v = 2,5$ м/с, вологовміст $d = 10$ г/кг с.п., тривалість – 225 хвилин. За графічно-аналітичним методом визначено кінематичні коефіцієнти: $a = 0,839$, $\ln(a) = 1,3$ та $\alpha(1/c) = 0,262$. Визначено, що граничним вологовмістом для сушіння подрібнених плодів томатів є 1,503%/мм, після чого починається процес згорання рослинної тканини.

Ключові слова: плоди томату-сливки, конвективне сушіння, кінетична залежність, граничний вологовміст

KINETICS OF DRYING THE CRUSHED FRUITS TOMATO

Khomychak L., D-r of Sciences, Technics, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,
Head of Department of Sugar Technology, Sugar Products and Ingredients,
Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine
ORCID ID:0000-0001-9003-0315

Petrova J., D-r of Sciences, Technics, Senior Researcher,
Chief Researcher of the Heat and Mass Transfer Department in Heat Technology,
Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
ORCID ID:0000-0001-7385-8435

Kuznetsova I., D-r of Sciences, Economics, Senior Researcher,
Deputy Academician-Secretary of the Plant Production Department,
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID ID:0000-0001-8530-2099

Yarmolyuk M., Postgraduate, Junior Researcher,
Department of Sugar Technology, Sugar Products and Ingredients,
Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine
ORCID ID:0000-0002-0315-9418

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-12-17>

Intensive development of breeding work for the creation of new promising varieties of tomatoes and the introduction of modern technologies for their cultivation prompts the urgency of developing new resource-saving technologies for their processing for food purposes. These technologies, first of all, drying, allow to process the processing of large volumes of non-standard tomatoes, which at present do not find demand among consumers. In the conditions development of breeding and technological processes for the creation of new promising varieties tomatoes, the development and technological basis for processing their fruits into food products. Settlement of tomato fruit processing promotes the use in the food industry of non-standard fruits, which do not find the demand of the consumer and remain in the field. Progress in this direction is impossible without deepening scientific ideas about the dynamics and energy of dehydration of plant material. The aim of the work is to study the kinetic characteristics the drying of tomatoes to obtain competitive products. Materials and methods of research. The plum

tomato fruits of Poplinsky type and hybrid Mikolka been grown in the subzone of inadequate moisture on the experimental sites the Institute Horticulture of NAAS (Borka village, Kyiv region). Where used the kinetics is drying has studied at the experimental booth of convective dryers in the Institute of Technical Thermophysics the National Academy of Sciences of Ukraine. For this purpose, the fruits of tomatoes were creamed cabbage, sliced in cubes of 5x5x5 mm and dried. Drying mode parameters: temperature of heat medium (air) $t = 60^{\circ}\text{C}$, coolant velocity $v = 2.5 \text{ m / s}$, moisture content $d = 10 \text{ g / kg s.p}$, thickness of layer 15 mm. Research results. Plant tissues belong to colloidal capillary-porous bodies, which, depending on the type and conditions of vegetation, contain from 20 to 95% water. The kinetics of shredded fruits in the dryer shows the prospect of using convection drying, during 295 minutes. The obtained kinetic dependence shows the predominant influence of moisture content on the length process and has a correlation of 0.9701. It has been shown that the moisture content of the drying agent influences the intensity of drying rate at its initial stage. The value of the approximation of experimental data is 0.995. The drying process typically takes place in three stages and has a linear function in terms the coefficient of internal diffusion. The approximation of experimental data by a linear function shows a decrease in the level of transition moisture in the shredded particles of the fruit tomato to their surface and the value of the correlation connection is 0.7079. The kinetic equation for determining the critical moisture content in crushed tomato-cream fruit is presented. Conclusions. It is proved that convective drying of chopped tomatoes is one of the most promising ways of obtaining tomato products. The technological conditions of drying are studied and the optimum mode is determined: the size is 5x5x5 mm, the thickness of the layer is 15 mm, the temperature of heat medium (air) $t = 60^{\circ}\text{C}$, the air velocity $v = 2,5 \text{ m / s}$, the moisture content $d = 10 \text{ g / kg s. etc.}$, duration – 225 minutes. The kinematic coefficients according to graphical-analytical method were determined: $a = 0.839$, $\ln(\alpha) = 1.3$ and $\alpha(1/c) = 0.262$. It has been determined that the critical moisture content for crushing tomatoes is 1.503% / mm, and the process of combustion plant tissue begins there after.

Key words: plum tomatoes, convective drying, kinetic dependence, boundary moisture content

Вступ. Інтенсивний розвиток селекційної роботи зі створення нових перспективних сортів томатів та впровадження сучасних технологій їх вирощування обумовлює актуальність розроблення нових ресурсоощадних технологій їх переробки на харчові цілі. Зазначені технології, насамперед сушіння, дають змогу налагодити переробку великих обсягів некондиційних томатів, що наразі не знаходять попиту серед споживачів. В умовах розвитку селекційних і технологічних процесів зі створення нових перспективних сортів томатів набуває розвитку й технологічні основи переробки їх плодів на харчові продукти. Серед овочевих культур, які вживає людина у свіжому і переробленому вигляді, томати займають важливе місце. Плоди томатів відомі як каратиновмісна сировина, і в продуктах їх переробки посилюються не тільки смакові але й фізико-хімічні властивості. Зокрема, було доведено, що за різних режимів температурного оброблення в отриманій томатній продукції вміст лікопину є дуже відмінним [1, 2], а концентрація амінокислот сприяє поліпшенню смакових якостей продукту. Крім того, налагодження переробки плодів томатів сприяє використанню в харчовій промисловості некондиційних плодів, які, не знаходячи попиту в споживача, залишаються в полі. Водночас Giovannucci E., Rimm E., Liu Y., Stampfer M.J. [3]; Heber D, Qing-Yi Lu [4] доведено концеропротекторну дію вітаміну А і певних каротиноїдів (кварцетину і лікопину).

Розвиток теоретичних основ технологічних аспектів сушіння плодів томатів сприяє отриманню високоякісних продуктів зі збереженням всього необхідного комплексу речовин. Прогрес в цьому напрямі неможливий без поглиблення наукових уявлень щодо динаміки та енергетики зневоднення рослинної сировини.

Метою роботи є вивчення кінетичних особливостей процесу сушіння плодів томатів для отримання конкурентоспроможної продукції.

Матеріали і методи досліджень. Використовували плоди томатів-сливок сорт Попільнянський і гібрид Миколка, що вирощені в підзоні недостатнього зволоження на дослідних ділянках станції Інституту овочівництва і баштанництва НААН (п/в Борова, Фастівський р-н. Київська обл.).

Кінетику сушіння вивчали на експериментальному стенді конвективної сушарки в Інституті технічної теплофізики НАН України. Для цього плоди томатів-сливок мили, нарізали розміром 5x5x5 мм і сушили. Режимні параметри сушіння: температура теплоносія (повітря) $t = 60^{\circ}\text{C}$, швидкість теплоносія $v = 2,5$ м/с, вологовміст $d = 10$ г/кг с.п., товщина шару 15 мм.

Експериментальний стенд (рис. 1) – це система ізольованих повітроводів з пристроями для теплової обробки та циркуляції теплоносія, сушильних камер, вимірювальних схем та приладів для контролю параметрів процесу сушіння та вимірювання значень, що характеризують процес висушування дослідного матеріалу. Стенд обладнаний трьома сушильними камерами: однією горизонтальною (модель «обдувки» - паралельний потік повітря) та двома вертикальними (модель «продувки»).



Рис. 1. Експериментальний стенд з конвективного процесу сушіння

Отримані сушені плоди томатів з масовою часткою сухих речовин 7,6% подрібнювали на кульовому млині до порошкоподібного стану.

Результати досліджень. Рослинні тканини належать до колоїдних капілярно-пористих тіл [5], які, залежно від виду та умов вегетації, містять від 20 до 95% води. Одна частина води в рослинних тканинах є розчинником і утворює сік з іншими компонентами плоду, тоді як друга частина вологи утримується біополімерами м'якоти. Як відомо, вода в рослинних тканинах перебуває в двох станах: вільна вода виявляє властивості, що схожі до природної води, зв'язана вода є наслідком гідратації енергетично вигідної взаємодії з макромолекулами біополімерів, молекулами та іонами клітинного соку [6, 7]. Зв'язана вода зазвичай не вилучається при сушінні сировини [8, 9].

Кінетика подрібнених плодів в сушарці (рис. 2.) показує перспективність використання конвективного сушіння, впродовж 295 хв.

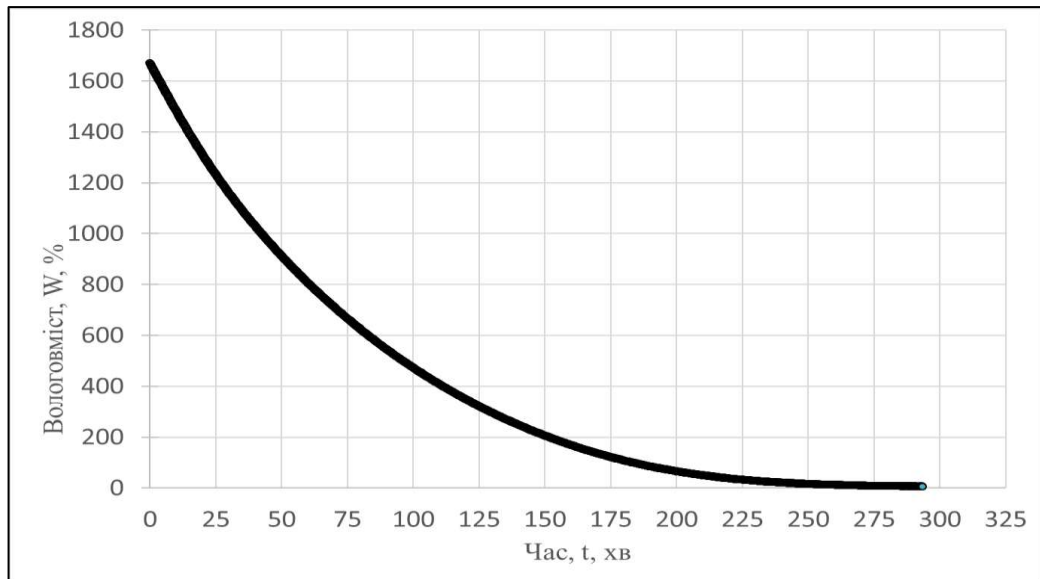


Рис. 2. Кінетика сушіння плодів томатів-сливок

Кінетична залежність описується залежністю:

$$W = 2897,8 \times e^{-0,389 \times t} \quad 1)$$

Кореляційний зв'язок при цьому становить 0,9701, що показує переважний вплив вологовмісту на тривалість процесу. Вологовміст сушильного агенту найбільше впливає на інтенсивність сушіння на початковій стадії зростання його швидкості. Швидкість процесу сушіння представлена лінійною залежністю (рис. 3), що свідчить про сталий перебіг процесу.

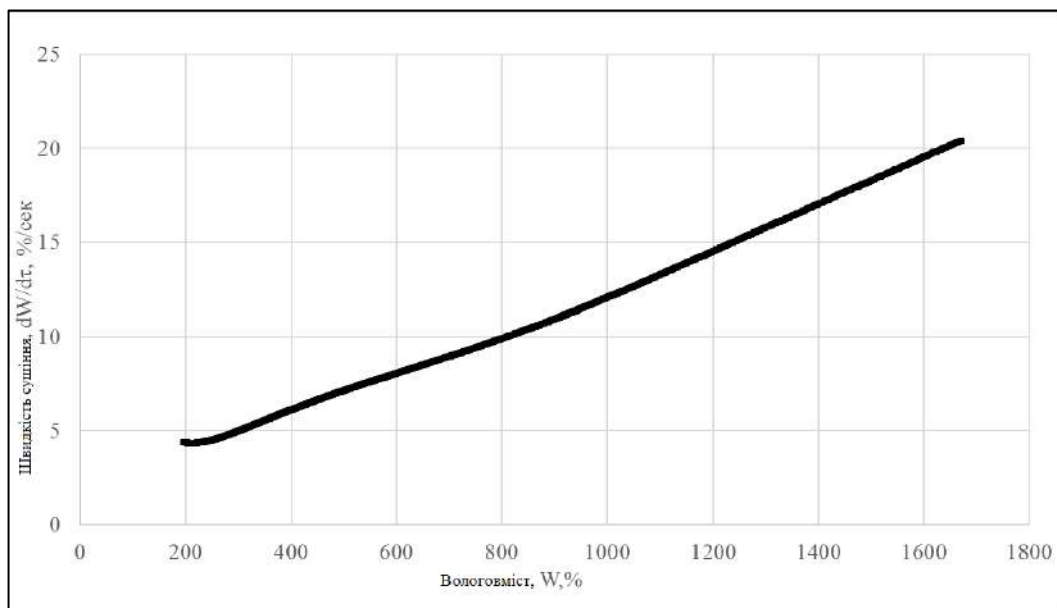


Рис. 3. Залежність швидкості сушіння від вологовмісту подрібнених плодів томатів-сливок

Отримана залежність описується рівнянням регресії:

$$V = 2,1083W + 1,6806 \quad 2)$$

де V – швидкість сушіння, %/с;

W – вологовміст, %.

Величина достовірності апроксимації експериментальних даних становить 0,995, що показує вагомий вплив швидкості процесу на вилучення вологи з рослинної тканини.

За збільшення вологовмісту теплоносія період постійного сушіння і кількість випареної вологи в цей період зростає. Із подальшим вилученням вологи із сировини ступінь впливу цього параметру не змінюється. Процес сушіння проходить в три етапи і за коефіцієнтом внутрішньої дифузії описується лінійною функцією (рис. 4).

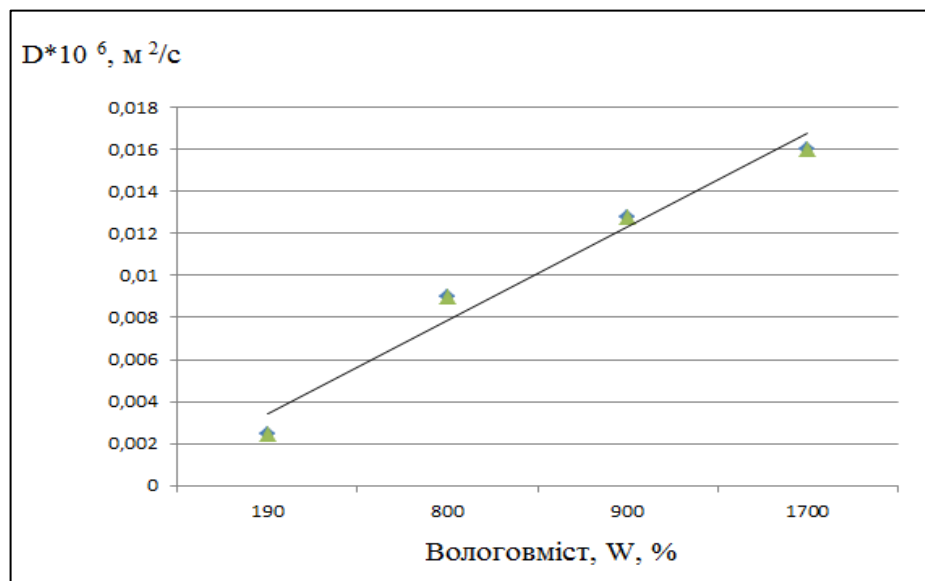


Рис. 4. Залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії (D) від вологовмісту (W) подрібнених плодів томатів

Апроксимація експериментальних даних лінійною функцією дала змогу отримати таку розрахункову залежність:

$$D^t = 0,0039D^{293} + 0,0015 \times (T - 293) \quad 3)$$

Значення кореляційного зв'язку 0,7079 показує послаблення рівня переходу вологи в подрібнених частках плоду томату до їх поверхні.

При I етапі сушіння відбувається механічне витіснення і винесення вологи, яка за рахунок механічних зв'язків формує шар між частинками. Кількість видаленої вологи при цьому залежить від висоти шару вологодисперсного матеріалу, полідисперсності, гранулометричного складу і перепаду тисків [10]. За сушіння подрібнених плодів томатів I етап починається з вологовмісту 1700% і завершується на його значенні 900%. Даний етап характеризує період прогрівання сировини з вилученням переважної частини (до 70%) вільної вологи. Швидкість сушіння зростає і досягає значення 11%/с.

За II етапу сушіння відбувається видалення поверхневої вологи, що виділилася під час сушіння на I етапі. Загальний тепломасообмін і кількість випаруваної вологи будуть пропорційними кількості підведеного до поверхні частинок тепла. Під час фільтраційного сушіння дисперсного матеріалу тепловий агент рухається в міжклітинному просторі і

віддає тепло вологому матеріалові. Даний етап є тривалим періодом для подрібнених плодів томатів та характеризує швидкість зовнішньої дифузії. При цьому зростає швидкість руху внутрішньої вологи до поверхні частинки плоду томату та становить 100%/с.

Під час завершального III етапу сушіння поверхня частинок є сухою, волога міститься лише в тріщинах, порах і капілярах частинок, а також між частинками подрібнених плодів томату в замкнених зонах, які є непроникні для теплового агенту. Сушіння окремих частинок в другому періоді відбувається за рахунок молекулярної дифузії вологи з середини частинки до її поверхні, а видалення вологи за межі шару – за рахунок вимушеної конвективної дифузії. При цьому вологовміст досягає максимально найнижчого значення 10%.

Визначення критичних значень вологості, тривалості та коефіцієнта сушіння здійснювали графічно-аналітичним методом, запропонованим Ликовим А. В. [5]. Результати досліджень (рис. 5) подано як графічну залежність:

$$\text{Lg}(W-W_r)=f(\tau), \quad (4)$$

де W – біжуча вологість, %
 W_r – рівноважна вологість, %
 T – тривалість сушіння, с.

Для опису кінетики сушіння подрібнених плодів томатів за експериментальними даними і отриманою графічною залежністю (рис. 5) визначаємо кінетичний коефіцієнт $\ln(a)$ і коефіцієнт α як тангенс кута нахилу прямої до абсциси [11].

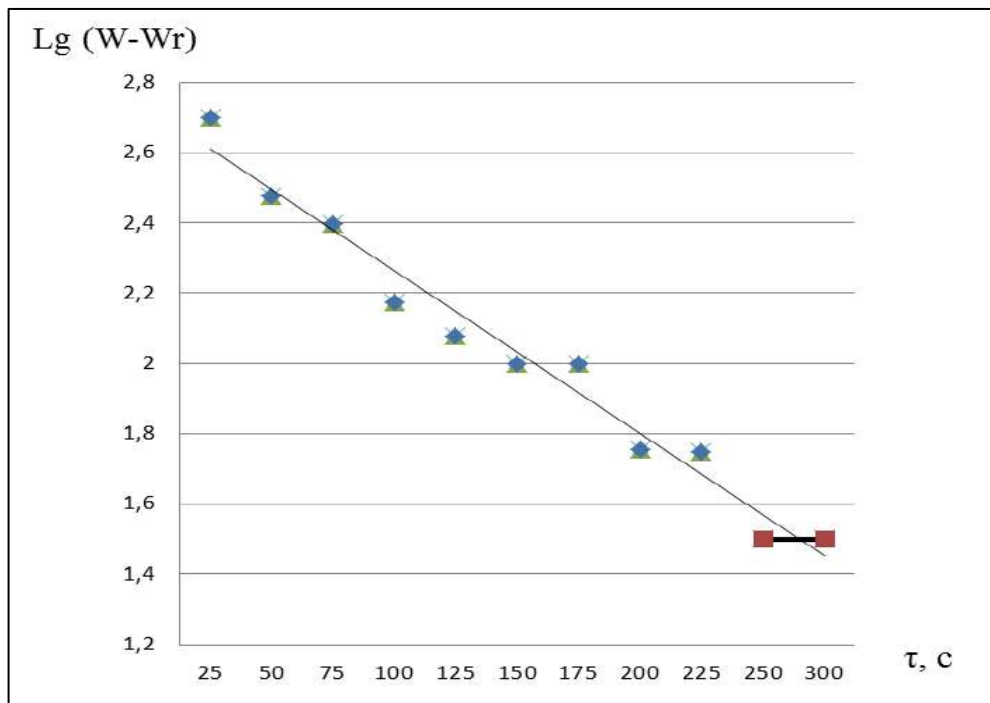


Рис. 5. Логарифмічна залежність кінетики сушіння подрібнених плодів томатів

Таким чином, кінетичні коефіцієнти мають значення: $a(1/m) - 0,839$; $\ln(\alpha) -1,3$; $\alpha(1/c) -0,262$

Для визначення критичного вологовмісту у подрібнених плодах томатів кінетичне рівняння матиме вигляд:

$$C = \sqrt{\frac{\alpha}{a \times H}}, \quad 5)$$

де C – критичний граничний вологовміст, %
 a , α – кінематичні коефіцієнти,
 H – товщина шару сировини, мм.

Після обрахунку визначено, що критично граничним вологовмістом для сушіння подрібнених плодів томатів є 1,503%/мм, після чого починається процес згорання рослинної тканини.

Висновки

Доведено, що конвективне сушіння подрібнених плодів томатів є одним з перспективних способів отримання томат-продуктів. Вивчено технологічні умови сушіння та визначено оптимальний режим: розмір – 5 x 5 x 5 мм, товщина шару 15 мм, температура теплоносія (повітря) $t = 60^\circ\text{C}$, швидкість теплоносія $v = 2,5$ м/с, вологовміст $d = 10$ г/кг с.п., тривалість – 225 хвилин.

За графічно-аналітичним методом визначено кінематичні коефіцієнти: $a = 0,839$, $\ln(\alpha) = 1,3$ та $\alpha(1/c) = 0,262$. Визначено, що критично граничним вологовмістом для сушіння подрібнених плодів томатів є 1,503%/мм, після чого починається процес згорання рослинної тканини.

Бібліографія

1. J Campbell J., Canene-Adams K., Lindshield B., Boileau T., Clinton S, Erdman J. Tomato Phytochemicals and Prostate Cancer Risk. The Journal of Nutrition. 2004. Issue 12. P. 3486–3492. doi.org/10.1093/jn/134.12.3486S.
2. Tonucci L., Holden J., Beecher G., Khachik F., Davis C., Mulokozi G. Carotenoid content of thermally processed tomato-based food products. J. Agric. Food Chem. 1995. №43. P. 579-586. doi.org/10.1021/jf00051a005.
3. Giovannucci E., Rimm E., Liu Y., Stampfer M., Willett W. A prospective study of tomato products, lycopene, and prostate cancer risk. J Natl Cancer Inst. 2002. 94(5). P. 391–398. doi: 10.1093/jnci/94.5.391.
4. Heber D., Lu Q-Y. Overview of Mechanisms of Action of Lycopene. Experimental Bio and Med. 2002. 227(10). P. 920-923. doi: 10.1177/153537020222701013.
5. Лыков А. В. Теория сушки. Москва: Энергия, 1968. 472 с.
6. Гольд В. М., Гаевский Н. А., Голованова Т. И., Белоног Н. П., Горбанева Т. Б. Физиология растений. Электронный учебно-методический комплекс; рук. творч. коллектива В. М. Гольд. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. 148 с.
7. Фрэнкс Ф., Саджетт А., Хаузер Х. и др. Вода в пищевых продуктах; под ред. Р. Б. Докуорта; пер. с англ. Москва: Пищ. промышленность, 1980. 376 с.
8. Овчаренко Ф. Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. Киев: Издательство АН УССР, 1961. 275 с.
9. Анджелл К. А., Скитс М. Г., Райс С. А. и др. Вода и водные растворы при температурах ниже 0°C . Под ред. Ф. Франкса; пер. с англ. З.В. Линевиц. Київ: Наукова думка, 1985. 387 с.
10. Атаманюк В. М., Ханьк Я. Н. Гидродинамика и кинетика фильтрационной сушки дисперсных материалов: материалы второй Международной научно-практической

конференции. Современные энергосберегающие технологии (Сушка и тепловые процессы) СЭТТ. Москва. 2005. С. 208–211.

11. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М., Микичак Б. М., Уткіна О. В. Моделювання тепло-масообмінних процесів під час фільтраційного сушіння струганого березового шпону. Видавництво Львівської політехніки. 2014. № 787. 479 с.

Reference

1. Campbell J., Canene-Adams K., Lindshield B., Boileau T., Clinton S, Erdman J. (2004). Tomato Phytochemicals and Prostate Cancer Risk. *The Journal of Nutrition*. Issue 12. P. 3486–3492. doi.org/10.1093/jn/134.12.3486S.
2. Tonucci L., Holden J., Beecher G., Khachik F., Davis C., Mulokozi G. (1995). Carotenoid content of thermally processed tomato-based food products. *J. Agric. Food Chem.* 1995. №43. P. 579-586. doi.org/10.1021/jf00051a005.
3. Giovannucci E, Rimm E., Liu Y, Stampfer M, Willett W. (2002). A prospective study of tomato products, lycopene, and prostate cancer risk. *J Natl Cancer Inst.* 94(5). P. 391–398. doi: 10.1093/jnci/94.5.391.
4. Heber D., Lu Q-Y. (2002). Overview of Mechanisms of Action of Lycopene. *Experimental Bio and Med.* 227(10). P. 920–923. doi: 10.1177/153537020222701013.
5. Lykov A. (1968) *Teoriya sushky [The theory of drying]*. Energiya [Energy]. Moscow. 472 p. [in Russian].
6. Gold V., Gaevsky N., Golovanova T., Belonog N., Gorbaneva T. (Gold V.M. Ed). (2008). *Fiziologiya rasteniy. [Plant physiology]*. Krasnoyarsk: IAS SFU. 148 p. [in Russian].
7. Franks F., Sadzhett A., Hauser H. and others. (Dokuorta R. Ed). (1980). *Voda v pischevyykh produktah. [Water in food products]*. Moscow: Food industry. 376 p. [in Russian].
8. Ovcharenko F. (1961). *Gidrofilnost glin i glinistyykh mineralov. [Hydrophilicity of clay and clay minerals]*. Kyiv: Publisher AN USSR, 275 p. [in Russian].
9. Angell K., Skits M., Rice S. and others. (Franks F. Ed). (1985). *Voda i vodnyie rastvoryi pri temperaturah nizhe 0°C. [Water and aqueous solutions at temperatures below 0°C]*. Kyiv: Scientific thought, 387 p. [in Russian].
10. Atamanyuk V., Khanyk Ya. (2005). *Gidrodinamika i kinetika filtratsionnoy sushki dispersnykh materialov [Hydrodynamics and kinetics of filtration drying of dispersed materials]*. Materialyi vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. *Sovremennyye energoberegayushchie tehnologii (Sushka i teplovyie protsessyi) SETT. [Materials of the second International Scientific and Practical Conference. Modern energy saving technologies (Drying and heat processes) SETT.]*. Moskva, P.208–211. [in Russian].
11. Kindzera D., Atamanyuk V., Mikichak B., Utkina O. (2014). *Modeliuvannia teplo-masoobminnykh protsesiv pid chas filtratsiinoho sushinnia struhanoho berezovoho shponu. [Modeling of heat and mass transfer processes during filtration drying of planed birch veneer]*. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. [Lviv Polytechnic Publishing House]. № 787. 479 p. [in Ukrainian].