

STUDY OF THE DRYING PROCESS, HEAT- AND MASSTRANSFER CHARACTERISTICS OF GLUTEN-FREE PASTA

I. Dubkovetskiy, V. Yurchak, O. Rozhno, V. Kazmiryshen
National University of Food Technologies

Key words:

gluten-free pasta,
drying kinetics,
drying rate,
thermo-physical
characteristics,
masstransfer characteristics

Article history:

Received 10.10.2016
Received in revised form
26.10.2016
Accepted 7.11.2016

Corresponding author:
alexgraves2@mail.ru

ABSTRACT

This article represents the research of kinetic and drying rate of the gluten-free pasta. The drying process of pasta was carried out by convective method, when the power of infrared heat. Their heat-transferring and mass-transferring properties were found. The heat transfer coefficient, thermal conductive coefficient, thermal diffusive coefficient and masstransfer coefficient belong to them. It was established that the drying rate of pasta with corn flour is higher when comparing with drying rate of pasta with wheat flour by drying temperature 40—80 °C. The first critical moistures for wheat and corn pasta were found. Thermo-physical characteristics of corn and wheat pasta are slightly different, and mass transfer increases in pasta with corn flour. The heat-transfer characteristics of the products due to their structure, which close to products made from wheat and corn flour.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ, ТЕПЛО- І МАСОБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗГЛЮТЕНОВИХ МАКАРОННИХ ВИРОБІВ

І.В. Дубковецький, канд. техн. наук,
В.Г. Юрчак, д-р. техн. наук,
О.В. Рожно,
В.О. Казьміришен
Національний університет харчових технологій

У статті досліджено кінетику та швидкість сушіння безглютенових макаронних виробів конвективним способом. Визначено їх тепло- і масообмінні характеристики: коефіцієнти теплообміну, теплопровідності, температуропровідності та масовіддачі. Встановлено, що швидкість сушіння макаронних виробів з кукурудзяного борошна є вищою порівняно зі швидкістю сушіння виробів з пшеничного борошна за температур сушіння 40—80 °С. Визначено значення першої критичної вологості для пшеничних і кукурудзяних макаронних виробів.

Ключові слова: безглютенові макаронні вироби, кінетика сушіння, швидкість сушіння, теплофізичні характеристики, масообмінні характеристики.

Постановка проблеми. Сушіння є вирішальним процесом виробництва макаронних виробів і значною мірою впливає на якість продукції. Теоретичні основи процесу сушіння макаронних виробів визначаються законами тепло- і масоперенесення [1]. Макаронне тісто є складним об'єктом сушіння, оскільки являє собою колоїдне капілярно-пористе тіло, для якого характерне утворення градієнта вологості під час сушіння, усадка розмірів сформованих виробів і виникнення напружень. Це, у свою чергу, призводить до утворення мікротріщин, впливає на міцність, скловидність виробів і перехід сухих речовин у варильну воду [2].

Авторами розроблені безглютенові кукурудзяні макаронні вироби для хворих на целиакію. Для обґрунтування параметрів технологічних процесів, зокрема процесу сушіння, важливо вивчити тепло- та масообмінні характеристики матеріалу як об'єкта сушіння.

Спосіб конвективного сушіння є традиційним для пшеничних макаронних виробів. Він базується на тепло- і вологообміні між матеріалом, який висушується нагрітим повітрям.

Важливо, що природа утворення різних видів зв'язку вологи з матеріалом зумовлює механізм видалення її при сушінні [3]. Волога набухання під час сушіння більшою мірою переміщується всередині матеріалу у вигляді рідини, шляхом дифузії через стінки клітин таким самим шляхом, як вона проникає в матеріал. Для видалення адсорбційно зв'язаної вологи потрібне перетворення її в пару всередині матеріалу, після чого вона переміщується всередині матеріалу у вигляді пари, тобто шляхом ефузії, для цього необхідні значні затрати тепла. Залежно від режиму процесу капілярна волога переміщується як у вигляді рідини (за рахунок капілярних сил), так і у вигляді пари (за рахунок різниці тиску).

Макаронне тісто під час сушіння виявляє деякі особливості, зумовлені характером поглинання вологи тістом під час замісу. Його готують з низькою вологістю, а отже, вільної вологи майже немає, вона повністю зв'язана різними формами зв'язку з білками і крохмалем, причому білки пшеничного борошна є більш гідрофільними. Кукурудзяні макаронні вироби не містять клейковинного білка, структуроутворення у них забезпечується за рахунок клейстеризації крохмалю сировини чи використання структуроутворювачів, тому характер зв'язування вологи у кукурудзяному тісті інший. Важливо дослідити процес сушіння макаронних виробів з кукурудзяного борошна у порівнянні з пшеничними макаронними виробами, що містять білки, які здатні до набухання та утримання води, і є основним структуроутворювачами у цих виробках.

Метою статті є дослідження кінетики сушіння безглютенових кукурудзяних макаронних виробів конвективним способом та визначення їх масообмінних і теплообмінних характеристик.

Матеріали і методи. Кукурудзяні макаронні вироби виготовляли з кукурудзяного борошна тонкого помелу й екструдованого кукурудзяного борошна за дозування екструдованого кукурудзяного борошна у кількості 20% до маси їх суміші. Як для пшеничних макаронних виробів, так і для кукурудзяних застосовували «теплий заміс» за температури води 40 °С, тісто готували вологістю 36%. Усі вироби формували на макаронному пресі МАКМА-М у вигляді короткорізаної локшини.

Дослідження кінетики сушіння проводили на експериментальній сушильній установці [4]. Принципова схема сушильної установки зображена на рис. 1.

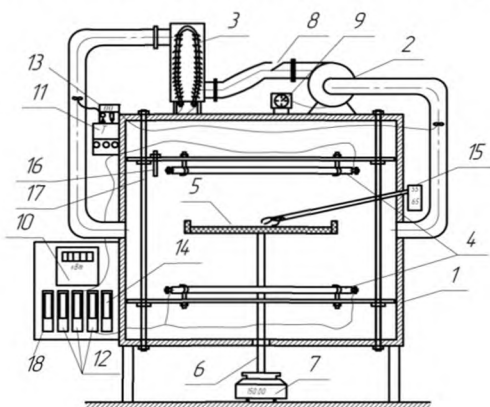


Рис. 1. Схема експериментальної сушильної установки: 1 — камера сушіння; 2 — вентилятор; 3 — калорифер; 4 — ІЧ-генератори; 5 — коробчастий сітчастий кошик; 6 — штанга; 7 — аналітичні терези; 8 — шибер рециркуляції повітря; 9 — варіатор швидкостей; 10 — лічильник електроенергії; 11 — контролер температури; 12 — автоматичні вимикачі калорифера, верхніх і нижніх ІЧ генераторів; 13 — регулятор відносної вологості; 14 — автоматичний вимикач вентилятора; 15 — термометр з термопарами; 16 — контактний датчик температури; 17 — регулювальний пристрій положення вузлів ІЧ генераторів; 18 — реле включення і виключення ІЧ-генераторів

Сушіння макаронних виробів здійснювали конвективним способом при вимкненому інфрачервоному нагріві. Кукурудзяні та пшеничні макаронні вироби, що піддавались сушінню, розкладали тонким шаром (1 см) на спеціальній сітці-підставці у коробчастому сітчастому кошику, який встановлений у корпус сушильної камери. Наважка макаронних виробів становила 200 г.

На блоці управління встановлювали температуру теплоносія. Покази зменшення маси визначали за допомогою вузла реєстрації. Сушіння проводилося до фіксування постійної маси висушеного продукту. Вузол реєстрації зменшення маси матеріалу виконаний на основі технічних ваг.

Процес сушіння макаронних виробів з кукурудзяного і пшеничного борошна досліджували за таких температур: 40 °С, 50 °С, 60 °С та 80 °С. Ці температурні параметри обґрунтовуються тим, що в промисловості для макаронних виробів застосовують різні режими сушіння залежно від обладнання, що входить в технологічну лінію: тристадійний режим сушіння за температур 35—45 °С та відносної вологості повітря 65—85% у різних зонах; режим зі змінною сушильною здатністю повітря на конвеєрних сушарках за температури сушіння 50—60 °С і відносної вологості повітря 50%, а також високотемпературні режими сушіння за температур 70—80 °С і відносної вологості повітря 75—85% [1].

Досліджували отримані криві кінетики сушіння $W = f(\tau)$ та швидкості сушіння $dW/d\tau = f(W)$. Розраховували тепло- та масообмінні характеристики виробів у процесі сушіння за формулами (1—5) [5].

Коефіцієнт теплообміну (α , Вт/(м²·К):

$$\alpha = Q/\Delta t_{cp} \cdot F, \quad (1)$$

де Q — кількість теплоти, кВт год/кг сирих виробів при сушінні; $\Delta t_{cp} = t_{п} - t_{м}$; $t_{п}$ — середньоарифметична температура повітря в сушильній камері, °С; $t_{м}$ — температура матеріалу (в першому періоді сушіння дорівнює температурі мокрого термометра), °С; F — зовнішня поверхня висушеного продукту, м²/кг.

Коефіцієнт теплопровідності (λ , Вт/м·К) визначали з рівняння критерію Нуссельта:

$$Nu = \alpha \cdot d/\lambda, \quad (2)$$

де d — визначальний розмір, м; Nu — критерій Нуссельта.

Критерій Рейнольдса Re , необхідний для розрахунку критерію Нуссельта, розраховували за формулою:

$$Re = w \cdot d \cdot \rho/\mu, \quad (3)$$

де w — швидкість потоку, м/с; ρ — густина, кг/м³; μ — динамічна в'язкість, Па·с.

Коефіцієнт температуропровідності (a , м²/год):

$$a = \lambda/c \cdot \rho, \quad (4)$$

де c — питома теплоємність, Дж/кг·°С.

Коефіцієнт масовіддачі (β , м/с):

$$B = J/(x_1 - x), \quad (5)$$

де $J = dW/dt$, $x = (M_6/M_n)(m_2/(1 - m_2))$, $x_1 = (M_6/M_n)(m_1/(1 - m_1))$; x — вологовміст повітря (кг/кг); x_1 — вологовміст повітря при постійній швидкості (перший період) сушіння (кг/кг); M_6, M_n — молярна маса води і повітря відповідно; m — мольні доли.

Результати дослідження. У першій серії дослідів вивчали кінетику сушіння макаронних виробів з кукурудзяного борошна порівняно з пшеничними макаронними виробами за температури сушіння 40 °С.

Отримані криві кінетики та швидкості сушіння за температури 40 °С свідчать (рис. 2), що кукурудзяні макаронні вироби сушаться швидше як у першому, так і в другому періодах та досягають вологості 10,0% за 180 хв, у той час як пшеничні за 260 хв досягають вологості 15,6%. До вологості 15,6% кукурудзяні макаронні вироби висушуються за 100 хв, тобто у 2,6 рази швидше. Імовірно, це пов'язано з тим, що білки пшеничного борошна міцніше утримують вологу та є більш гідратованими, ніж крохмаль, який є основним структуроутворювачем у кукурудзяних макаронних виробих.

Перший період сушіння з постійною швидкістю для пшеничних макаронних виробів триває до критичної вологості 30,2%, а для кукурудзяних — до 29,0%. Швидкість сушіння у першому періоді становить для пшеничних і кукурудзяних виробів 0,29%/хв та 0,35%/хв відповідно.

У другій серії дослідів отримано криві кінетики сушіння пшеничних і кукурудзяних макаронних виробів $W = f(\tau)$ (рис. 3, 5) та швидкості сушіння $dW/dt = f(W)$ (рис. 4, 6), за температури сушіння 40 °С, 50 °С, 60 °С та 80 °С.

Як свідчать отримані дані (рис. 3), зі зростанням температури від 40 °С до 80 °С спостерігається зниження першої критичної вологості при сушінні для пшеничних макаронних виробів. При температурі 40 °С перша критична вологість становить — 30,2%, при 50 °С — 30,0 %, при 60 °С — 28,7%, при 80 °С — 26,9%. Вона досягається при різних температурах за однаковий проміжок часу — 20 хв.

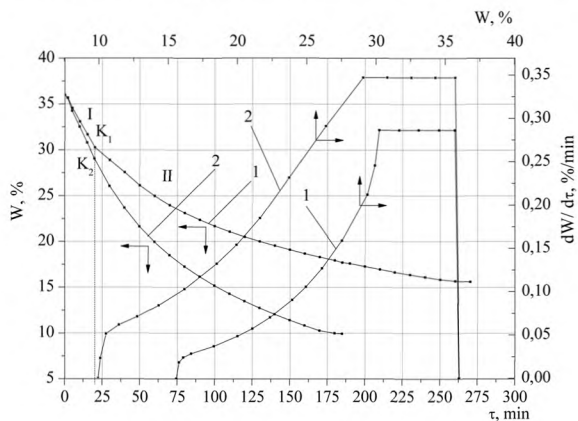


Рис. 2. Криві кінетики і швидкості сушіння макаронних виробів за температури 40 °С, де 1 — пшеничні макаронні вироби, 2 — кукурудзяні макаронні вироби; I — перший період сушіння, II — другий період сушіння

З рис. 5 видно, що швидкість сушіння пшеничних макаронних виробів закономірно зростає зі збільшенням температури повітря в сушильній камері. При температурі 40°С швидкість сушіння макаронних виробів у першому періоді становить — 0,29%/хв, при 50 °С — 0,3%/хв, при 60°С — 0,37%/хв, при 80 °С — 0,47%/хв.

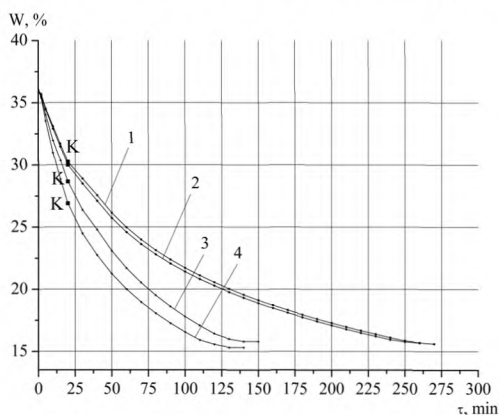


Рис. 3. Криві кінетики сушіння пшеничних макаронних виробів $W = f(\tau)$ за температури:
1 — 40 °С, 2 — 50 °С, 3 — 60 °С, 4 — 80 °С

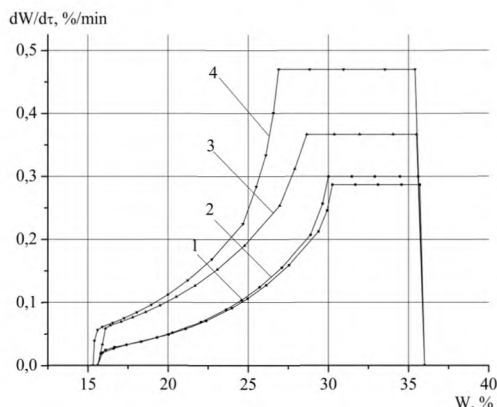


Рис. 5. Криві швидкості сушіння $dW/d\tau = f(W)$ для пшеничних макаронних виробів за температури:
1 — 40 °С, 2 — 50 °С, 3 — 60 °С, 4 — 80 °С

З рис. 4 видно, що при температурі 40 °С вологість для кукурудзяних макаронних виробів у першій критичній точці становить — 29,0%, при 50 °С — 25,9%, при 60 °С — 22,5%, при 80 °С — 19,9%. Як і в пшеничних макаронних виробках, перший період сушіння за різних температур досягається за 20 хв.

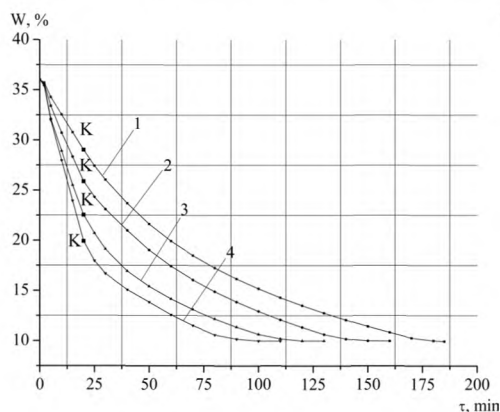


Рис. 4. Криві кінетики сушіння кукурудзяних макаронних виробів $W = f(\tau)$ за температури: 1 — 40 °С, 2 — 50 °С, 3 — 60 °С, 4 — 80 °С

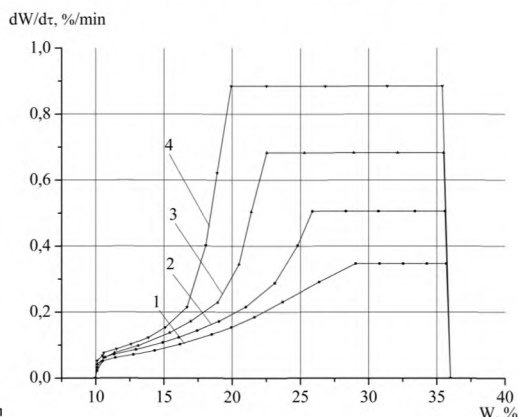


Рис. 6. Криві швидкості сушіння $dW/d\tau = f(W)$ для пшеничних макаронних виробів за температури: 1 — 40 °С, 2 — 50 °С, 3 — 60 °С, 4 — 80 °С

Як видно з рис. 6, при температурі 40 °С швидкість сушіння кукурудзяних макаронних виробів є вищою, ніж у пшеничних і у першому періоді становить — 0,35 %/хв, при 50 °С — 0,51%/хв, при 60 °С — 0,68%/хв, при 80 °С — 0,89%/хв.

Макаронні вироби з кукурудзяного борошна висушуються до вологості 10,0% швидше, порівняно з пшеничними макаронними виробами до вологості 15,6% за температури сушіння 40 °С — у 1,46 раза, за температури 50 °С — у 1,62 раза, 60 °С — у 1,15 раза, 80 °С — у 1,27 раза. До однакової вологості 15,6% кукурудзяні макаронні вироби висушуються за різних температур приблизно у 2,7—3,5 раза швидше, ніж пшеничні вироби.

Основні характеристики та теплофізичні показники процесу сушіння пшеничних і кукурудзяних макаронних виробів наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Основні характеристики процесу сушіння пшеничних і кукурудзяних макаронних виробів

Макаронні вироби	t, °С	Характеристики процесу сушіння				
		W ₁ ^{кр} , %	Час досягнення 1-ї критичної точки, хв	Швидкість сушіння у першому періоді, %/хв	Швидкість сушіння у другому періоді, %/хв	Загальна тривалість сушіння, хв
1	2	3	4	5	6	7
З пшеничного борошна	40	30,2	20	0,29	до вологості 15,6%.	
	50	30,0		0,30	0,29-0,02	270
	60	28,7		0,37	0,30-0,02	260
	80	26,9		0,47	0,37-0,03	150
				0,47-0,04	140	

Продовження табл. 1.

1	2	3	4	5	6	7
З кукурудзяного борошна	40	29,0	20	0,35	до вологості 10,0%.	
	50	25,9			0,35-0,02	185
	60	22,5		0,51	0,51-0,03	160
	80	19,9		0,68	0,68-0,04	130
				0,89	0,89-0,05	110

Таблиця 2. Основні теплофізичні показники процесу сушіння пшеничних і кукурудзяних макаронних виробів

Макаронні вироби	t, °C	Теплофізичні характеристики процесу сушіння			
		Коефіцієнт теплообміну (α, Вт/(м ² К))	Коефіцієнт теплопровідності (λ, Вт/м К)	Коефіцієнт масовіддачі для 1-го періоду (β, м/с)	Коефіцієнт температуропровідності (а · 10 ⁸ , м ² /год)
З пшеничного борошна	40	69,44	0,0189	47,83	1,103
	50	90,91	0,0267	33,33	1,557
	60	137,50	0,0435	28,23	2,535
	80	281,25	0,1036	22,38	6,036
З кукурудзяного борошна	40	65,97	0,0180	57,83	1,160
	50	94,70	0,0278	56,22	1,795
	60	137,50	0,0435	52,54	2,806
	80	255,21	0,0940	42,14	6,063

Коефіцієнти теплообміну α, теплопровідності λ, температуропровідності а зростають зі збільшенням температури сушіння з 40 °C до 80 °C, але незначно відрізняються для виробів з пшеничного та кукурудзяного борошна.

Коефіцієнт масовіддачі β зменшується зі зростанням температури сушіння, але за всіх температур є вищим для макаронних виробів з кукурудзяного борошна.

Імовірно, що теплообмінні характеристики виробів зумовлені їх структурою, яка є близькою для виробів з пшеничного і кукурудзяного борошна, і вони описуються рівняннями: для пшеничних — $\alpha = 0,032 \cdot t^{3,054}$, $R^2 = 0,976$; для кукурудзяних — $\alpha = 0,045 \cdot t^{1,966}$, $R^2 = 0,995$. На масообмінні властивості впливають більшою мірою форми й енергія зв'язку вологи у напівфабрикатах, які, очевидно, відрізняються для виробів з різного борошна і вони описуються рівняннями: для пшеничних — $\beta = 2348 \cdot t^{-1,07}$, $R^2 = 0,966$; для кукурудзяних — $\beta = -0,404 \cdot t + 75,45$, $R^2 = 0,961$. Проте це питання потребує поглибленого вивчення.

Висновки.

1. Встановлено, що швидкість сушіння макаронних виробів з кукурудзяного борошна є вищою порівняно зі швидкістю сушіння виробів з пшеничного борошна як у першому, так і в другому періодах сушіння, зростає зі збільшенням температури сушіння і сприяє досягненню ними нижчої вологості за більш короткий час сушіння.

2. Макаронні вироби з кукурудзяного борошна висушуються до вологості 10,0% швидше у 1,15—1,62 раза, ніж пшеничні макаронні вироби до вологості 15,6% за температури сушіння 40—80 °C, а до однакової вологості 15,6% приблизно у 2,7—3,5 раза швидше.

3. Значення першої критичної вологості знижується зі збільшення температури сушіння і становить для пшеничних макаронних виробів 30,2—26,9% за температури сушіння 40—80 °С; для макаронних виробів з кукурудзяного борошна становить 29,0—19,9% за температури сушіння 40—80 °С. Перший період сушіння (до першої критичної вологості) триває для всіх виробів приблизно однаковий час — 20 хв. Швидкість сушіння у першому періоді для макаронних виробів з пшеничного борошна становить 0,29—0,47%/хв за температур 40—80 °С, для кукурудзяних макаронних виробів — 0,35-0,89%/хв.

4. Теплофізичні характеристики кукурудзяних і пшеничних макаронних виробів незначно відрізняються, а масообмінні (коефіцієнт масовіддачі) збільшуються в макаронних виробках з кукурудзяного борошна.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Медведев, Г.М.* Технология макаронных изделий / Г.М. Медведев. — СПб.: Гиорд, 2005. — 308 с.
2. *Назаров, Н.И.* Технология макаронных изделий / Н.И. Назаров. — М.: Пищ. пром-сть, 1978.
3. *Гинзбург, А.С.* Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — Т. 1.
4. Патент на корисну модель, № 105278 України, МПК А23В 7/02 (2006.01), F26В 3/30 (2006.01). Радіаційно-кондуктивна сушильна установка / Дубковецький І.В., Бурлака Т.В., Малежик І.Ф. — u201509129 ; заявл. 22.09.2015 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. 5.
5. *Дубковецький, І.В.* Дослідження процесу мікрохвильового зневоднення глоду / Дубковецький І.В., Малежик І.Ф., Шевчук Я.В. // Харчова промисловість. — 2012. — № 13. — С. 127—133.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ, ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗГЛЮТЕНОВЫХ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

И.В. Дубковецкий, В.Г. Юрчак, О.В. Рожно, В.А. Казьмирышен
Национальный университет пищевых технологий

В статье исследованы кинетика и скорость сушки безглютеновых макаронных изделий конвективным способом. Определены их тепло- и массообменные характеристики: коэффициенты теплообмена, теплопроводности, температуропроводности и массоотдачи. Установлено, что скорость сушки макаронных изделий из кукурузной муки выше по сравнению со скоростью сушки изделий из пшеничной муки при температурах сушки 40—80 °С. Установлено значение первой критической влажности для пшеничных и кукурузных макаронных изделий.

Ключевые слова: безглютеновые макаронные изделия, кинетика сушки, скорость сушки, теплофизические характеристики, массообменные характеристики.