

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ПОМОЛА ЗЕРНА ПАЙЗЫ МЕТОДОМ
АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ

N. N. Filonova, M. K. Sadygova,

T. V. Kirillova, I. Yu. Kanevskaya

OPTIMIZATION OF PARAMETERS AND MODES OF GRAIN GRINDING
BY ADDITIVE CONVOLUTION METHOD

Филонова Надежда Николаевна – асп. каф. технологий продуктов питания Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, г. Саратов.

E-mail: sadigova.madina@yandex.ru

Садьгова Мадина Карипуловна – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий продуктов питания Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, г. Саратов.

E-mail: sadigova.madina@yandex.ru

Кириллова Татьяна Валерьяновна – канд. техн. наук, доц. каф. математики, механики и инженерной графики Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, г. Саратов. E-mail: sadigova.madina@yandex.ru

Каневская Ирина Юрьевна – канд. с.-х. наук, доц. каф. математики, механики и инженерной графики Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, г. Саратов.

E-mail: sadigova.madina@yandex.ru

Filonova Nadezhda Nikolaevna – Post-Graduate Student, Chair of Technologies of Nutrition Products, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Saratov.

E-mail: sadigova .madina@yandex.ru

Sadygova Madina Karipullovna – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Technologies of Nutrition Products, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Saratov.

E-mail: sadigova .madina@yandex.ru

Kirillova Tatyana Valeryanovna – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Saratov.

E-mail: sadigova .madina@yandex.ru

Kanevskaya Irina Yuryevna – Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Chair of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, Saratov.

E-mail: sadigova.madina@yandex.ru

Цель исследования – оптимизировать параметры и режимы помола зерна пайзы для получения муки высокого качества. Задачи исследования – получение муки из зерна пайзы при различных параметрах отволаживания, определение качества, оптимизация параметров и режимов помола зерна пайзы методом регрессионного анализа. В качестве объекта исследования выбрана культура пайза, которая по химическому составу и пищевой ценности близка к зерну чумизы и сорго сахарного, но значительно дешевле. В исследовании использовано зерно пайзы сорта Готика, выращенной в условиях Саратовской области в учебном хозяйстве ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова НПО «Поволжье», расположенном в Энгельском муниципальном районе. Методом ад-

дитивной свертки оптимизированы параметры и режимы помола зерна пайзы. Муку из зерна пайзы получали путем помола на лабораторной мельнице Quadrumat®Junior. Для оптимизации технологических параметров помола зерна пайзы построили регрессионные модели второго порядка, используя ортогональное центральное композиционное планирование (ОЦКП). Влажность муки определяли по ГОСТ 9404-88, белизну муки – с помощью прибора «Белизномер Блик-РЗ» по ГОСТ 26361-84 в техно-химической лаборатории кафедры «Технологии продуктов питания» ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова. По показателям выход муки, влажность и белизна муки построены математические модели второго порядка. Сначала для анализа поверхности от-

клика строится полный факторный эксперимент. Задачу многокритериальной оптимизации методом аддитивной свертки преобразовали в однокритериальную задачу. По итогам анализа полученных данных, для получения качественной муки из зерна пайзы параметры и режимы следующие: оптимальная влажность зерна – 14 %, продолжительность отволаживания – 8 ч.

Ключевые слова: мука из зерна пайзы, влажность зерна, белизна муки, ортогональное планирование, математическая модель 2-го порядка, центральное композиционное планирование.

The research objective was to optimize the parameters and the modes of grinding of grain of a payza for receiving quality flour. The research problems were receiving the flour from payza grain at various parameters of dragging, determination of the quality, the optimization of the parameters and the modes of a grinding of grain of payza by the method of the regression analysis. As the object of the research the culture of payza which on chemical composition and nutrition value was close to the grain of chumiz and sorghum sugar was chosen, but is much cheaper. In the research payza variety Gotika of the grain grown up in the conditions of Saratov Region in educational farm of FSBEI HE Saratov SAU named after N. I. Vavilov RPU Volga Region located in Engelsky municipal area was used. The method of additive convolution optimized parameters and the modes of grinding of grain of payza. The flour from grain of payza was received by grinding in the laboratory mill of Quadrumat®Junior. For the optimization of technological parameters of grinding of grain of payza regression models of the second order were constructed, using orthogonal central composite plan-

ning (OCCP). The humidity of the flour was determined in accordance with State Standard 9404-88, the flour whiteness - by the Beliznomer Blik-P3 device in accordance with State Standard 26361-84 in Technical and Chemical Laboratory of the Chair of Technologies of Nutrition of FSBEI HE Saratov SAU named after N. I. Vavilov. On the indicators of the flour exit, the humidity and the whiteness of the flour were constructed mathematical models of the second order. First of all for the analysis of the surface of the response complete factorial experiment was based. The problem of multicriteria optimization by method of additive convolution was transformed to a one-criteria task. Following the results of the analysis of the obtained data for receiving qualitative flour from payza grain parameters and the modes following: optimum humidity of grain was 14 %, dragging duration was 8 hours.

Keywords: flour from payza grain, grain moisture, flour whiteness, orthogonal planning, mathematical model of the 2-nd order, Central compositional planning.

Введение. Одной из технологических задач при создании функциональных продуктов питания является сохранение традиционного качества обогащенного продукта [1].

Цель исследования: оптимизировать параметры и режимы помола зерна пайзы для получения муки высокого качества.

Пайза (японское просо, китайское просо, просянка) – *Echinochloa frumentaceae* – принадлежит к группе просовидных культур семейства злаковых. Пайза по химическому составу и пищевой ценности близка к зерну чумизы и сорго сахарного, но значительно дешевле.

О.С. Корзун и другие (2011) утверждают, что зерно пайзы по составу и питательности не уступает ячменю и овсу (табл. 1) [2].

Таблица 1

Химический состав зерна пайзы, % на абсолютно сухое вещество

Показатель	Значение
Сырой протеин	14,21
Жир	4,25
Клетчатка	10,87
БЭВ	80,04
Зола	1,88
Сахар	0,82

Пайза признана экологически чистой культурой. Благодаря исследованиям, проводимым в условиях Полесья Украины и в Могилевском филиале РНИУП «Институт радиологии», доказано, что на загрязненных радионуклидами почвах целесообразна замена кукурузы на пайзу, так как она обладает невысоким уровнем накопления цезия-137 [2].

В Саратовском аграрном университете доказана перспективность применения муки из зерна пайзы в технологии хлебобулочных и кондитерских изделий [3–8].

Объект и методы исследования. Объект исследования – зерно пайзы сорта Готика, выращенной в условиях Саратовской области в учебном хозяйстве ФГБОУ ВО Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова НПО «Поволжье», расположенном в Энгельском муниципальном районе.

Муку из зерна пайзы получали путем помола на лабораторной мельнице Quadrumat@Junior (рис. 1).

Технологическая схема производства муки из зерна пайзы представлена на рисунке 2.

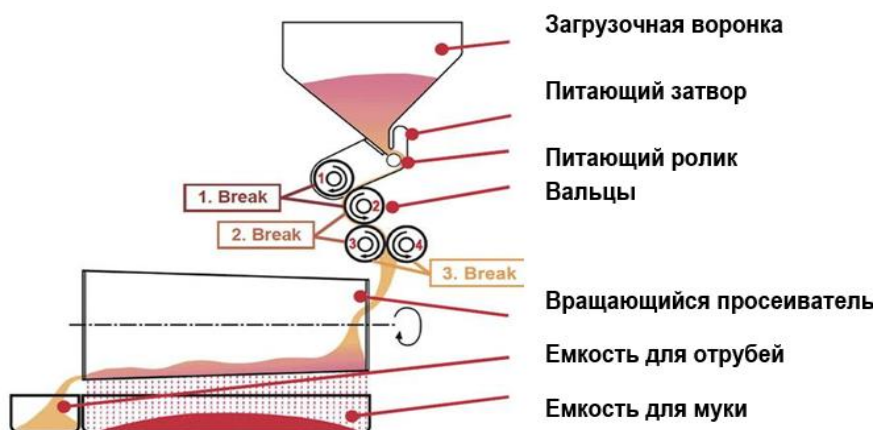


Рис. 1. Устройство лабораторной мельницы

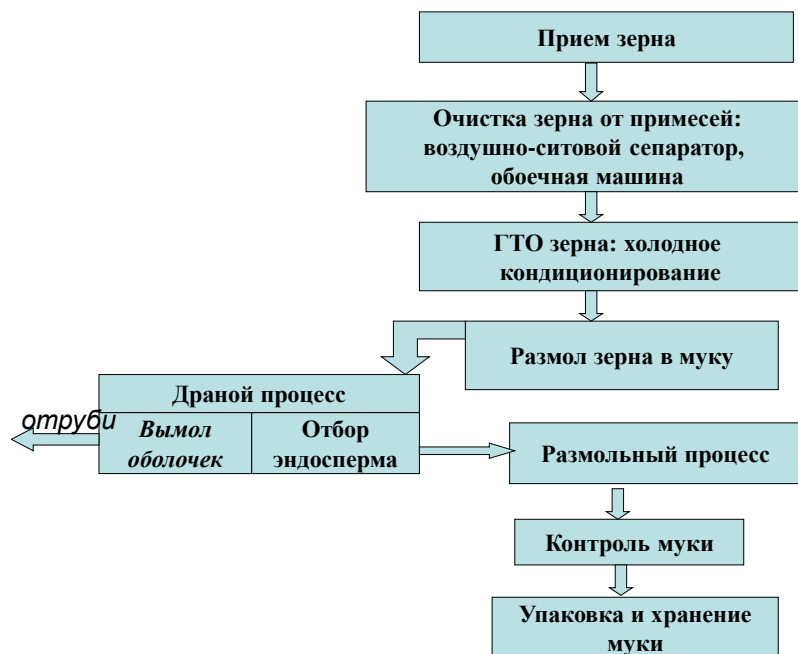


Рис. 2. Технологическая схема подготовки и помола зерна чумизы

Влажность муки определяли по ГОСТ 9404-88, белизну муки с помощью прибора «Белизномер "Блик-РЗ"» по ГОСТ 26361-84.

Для оптимизации технологических параметров помола зерна пайзы построили регрессионные модели второго порядка, используя ортогональное центральное композиционное планирование (ОЦКП).

Основная особенность ЦКП заключается в том, что оно позволяет применять методы последовательного планирования эксперимента.

Сначала для анализа поверхности отклика строится ПФЭ. Далее, если результаты анализа не удовлетворяют исследователя, то ПФЭ дорабатывается до ЦКП и проводится более полное изучение поверхности отклика. В этом случае композиционные планы дают выигрыш по числу опытов по сравнению с другими планами [9].

По полученным экспериментальным данным построим математическую модель второго порядка, пригодную для оптимизации процесса получения муки из зерна пайзы (табл. 2–4).

Таблица 2

Выход муки, %

x_1 – влажность зерна	x_2 – продолжительность отволаживания, ч		
	4	6	8
12	45,69	46,10	40,50
13	45,44	45,43	44,25
14	42,85	39,60	47,00

Таблица 3

Влажность муки, %

x_1 – влажность зерна	x_2 – продолжительность отволаживания, ч		
	4	6	8
12	10	11,5	11,6
13	11,7	11,11,6	12,1
14	10,9	11,8	10,9

Таблица 4

Белизна муки, ед. пр.

x_1 – влажность зерна	x_2 – продолжительность отволаживания, ч		
	4	6	8
12	20	20	22
13	24	25	27
14	28	29	32

Результаты исследования и их обсуждение. Описание области вблизи экстремума на поверхности отклика в пространстве достигается использованием полинома второго порядка, для чего применяют ортогональное центральное композиционное (последовательное) планирование, дополнив уже реализованный план первого порядка некоторым количеством экспериментальных точек, которые расположены определенным образом, а именно: в центре плана

и в четырех звездных точках – вершинах квадрата, координаты которых для двух факторов равны: $(\pm 1, 0)$; $(0, \pm 1)$.

Таким образом, при центральном композиционном планировании общее число опытов при двух факторах равно 9.

Уравнение полинома при таком планировании имеет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}(X_1^2 - 2/3) + b_{22}(X_2^2 - 2/3).$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{k=1}^9 (X_{ik}^2 - 2/3)_k}{\sum_{k=1}^9 (X_{ik}^2 - 2/3)^2},$$

$$i = 1, 2,$$

Коэффициенты модели вычисляются по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{k=1}^9 \tilde{y}_k}{9};$$

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^9 X_{ik} \tilde{y}_k}{\sum_{k=1}^9 x_{ik}^2}, \quad i = 1, 2;$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{k=1}^9 X_1 X_2 \tilde{y}_k}{\sum_{k=1}^9 (X_1 X_2)^2};$$

где X_1, X_2 – кодированные значения факторов, связанные с натуральными значениями x_i соотношениями:

$$X_1 = \frac{x_1 - 13}{1}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 6}{2};$$

\tilde{y}_k – результаты эксперимента.

В таблицах 5, 6 и на рисунках 3–8 представлены результаты моделирования.

Таблица 5

Матрица ортогонального плана типа 2^2 второго порядка

Номер опыта	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов		$X_1 X_2$	$X_1^2 - 2/3$	$X_2^2 - 2/3$
	$x_{1..}$	x_2	X_1	X_2			
1	12	4	-1	-1	1	0,33 р.	0,33 р.
2	14	4	1	-1	-1	0,33 р.	0,33 р.
3	12	8	-1	1	-1	0,33 р.	0,33 р.
4	14	8	1	1	1	0,33 р.	0,33 р.
5	13	6	0	0	0	-0,67 р.	-0,67 р.
6	12	6	-1	0	0	0,33 р.	-0,67 р.
7	14	6	1	0	0	0,33 р.	-0,67 р.
8	13	4	0	-1	0	-0,67 р.	0,33 р.
9	13	8	0	1	0	-0,67 р.	0,33 р.

Таблица 6

Оценки коэффициентов модели

Функция отклика	Значение коэффициента					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Y_1 , выход муки, %	44,10	-0,47	-0,37	2,34	-1,42	0,355
Y_2 , белизна муки, ед. пр.	25,22	4,50	1,50	0,50	-0,17	0,83
Y_3 , влажность муки, %	11,34	0,08	0,33	-0,40	-0,68	-0,43

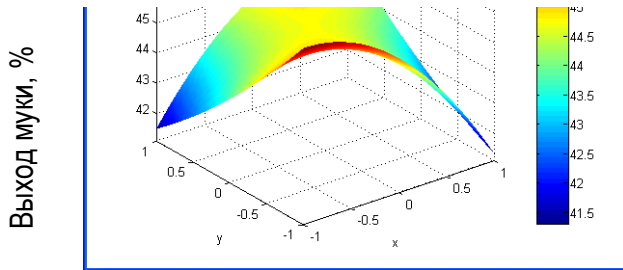


Рис. 3. Общий вид поверхности отклика Y_1

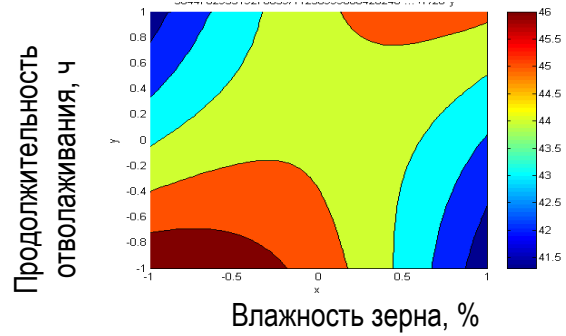


Рис. 4. Двумерные сечения поверхности отклика Y_1

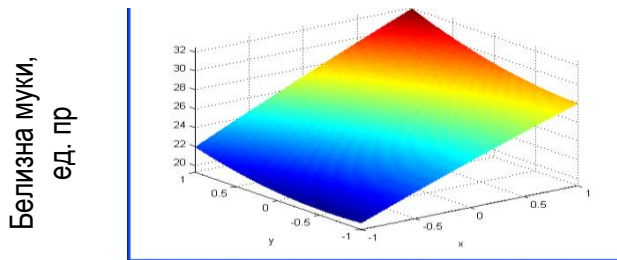


Рис. 5. Общий вид поверхности отклика Y_2

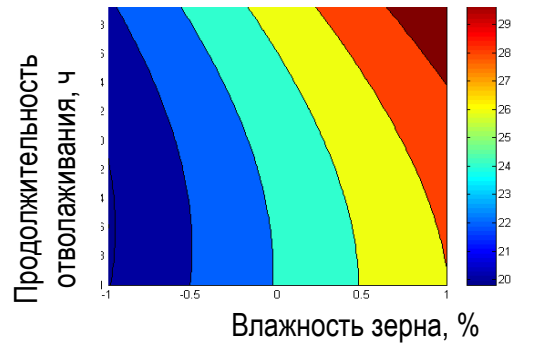


Рис. 6. Двумерные сечения поверхности отклика Y_2

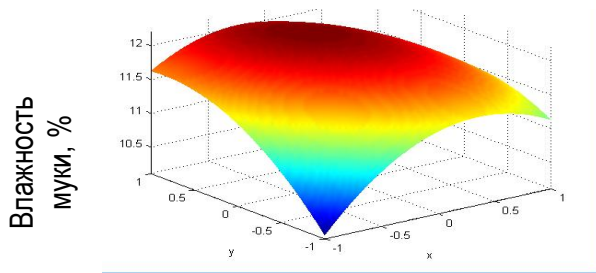


Рис. 7. Общий вид поверхности отклика Y_3

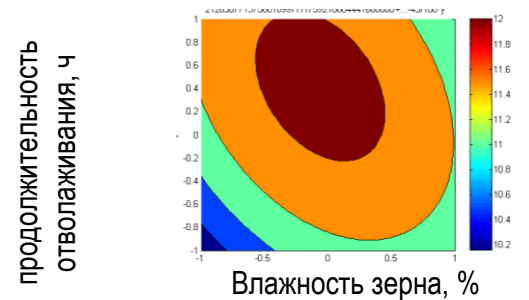


Рис. 8. Двумерные сечения поверхности отклика Y_3

Для определения оптимальных параметров и режимов процесса получения муки из зерна пайзы составим математическую модель оптимизации по двум критериям:

$$44,10 - 0,47X_1 - 0,37X_2 + 2,34X_1X_2 - 1,42(X_1^2 - 2/3) + 0,355(X_2^2 - 2/3) \rightarrow \max;$$

$$25,22 + 4,50X_1 + 1,50X_2 + 0,50X_1X_2 - 0,17(X_1^2 - 2/3) + 0,83(X_2^2 - 2/3) \rightarrow \max$$

при ограничениях: $-1 \leq X_1, X_2 \leq 1$;

$$10 \leq 11,34 + 0,08X_1 + 0,33X_2 - 0,04X_1X_2 - 0,68(X_1^2 - 2/3) - 0,43(X_2^2 - 2/3).$$

Задачу многокритериальной оптимизации методом аддитивной свертки преобразуется в однокритериальную задачу:

$$z = \alpha_1 f_1(X_1, X_2) / f_1^*(X_1, X_2) + \alpha_2 f_2(X_1, X_2) / f_2^*(X_1, X_2) \rightarrow \max,$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, $\alpha_1 \geq 0$, $\alpha_2 \geq 0$; $f_1^*(X_1, X_2)$, $f_2^*(X_1, X_2)$ – оптимальные значения критериев.

Вектор весовых коэффициентов критериев $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$ определяет приоритет соответствующего критерия.

При $\alpha = (1/2, 1/2)$ получим однокритериальную задачу:

$$f_1(X_1, X_2)/2f_1^*(X_1, X_2) + f_2(X_1, X_2)/2f_2^*(X_1, X_2) \rightarrow \max x$$

при ограничениях: $-1 \leq X_1, X_2 \leq 1$;

$$10 \leq 11,34 + 0,08X_1 + 0,33X_2 - 0,04X_1X_2 - 0,68(X_1^2 - 2/3) - 0,43(X_2^2 - 2/3) \leq 14.$$

Решением задачи является точка $X_1 = 1$; $X_2 = 1$. Для натуральных значений факторов получим решение $x_1 = 14$; $x_2 = 8$.

Вывод. В результате проведенного анализа полученных данных, можно сделать вывод, что для получения качественной муки из зерна пайзы параметры и режимы следующие: оптимальная влажность зерна – 14 %, продолжительность отволаживания – 8 ч.

Литература

1. *Тарасенко Н.А., Баранова З.А.* Современные исследования в нутрициологии и профилактике нерационального питания // Известия вузов. Пищевая технология. 2016. № 4 (352). С. 6–10.
2. *Корзун О.С.* и др. Возделывание просовидных культур в Республике Беларусь. Гродно: Изд-во ГГАУ, 2011. 189 с.
3. *Садыгова М.К., Башинская О.С., Кондрашова А.В.* и др. Безопасность и качество регионального сырья для производства продуктов для здорового питания // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2018. Т. 7, № 3 (43). С. 70–75.
4. *Яценко С.В., Садыгова М.К.* Применение пайзовой муки в технологии хлебобулочных изделий с пролонгированным сроком // Аллея Науки. 2018. Т. 3, № 8 (24).
5. *Яценко С.В., Садыгова М.К., Филонова Н.Н.* Перспективы применения пайзовой муки в технологии мучных кондитерских изделий // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: мат-лы V Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГУИТ, 2018. С. 127–131.
6. *Яценко С.В., Садыгова М.К., Филонова Н.Н.* Влияние пайзовой муки на биотехнологические свойства хлебопекарного полуфабриката // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике: мат-лы XVII Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: Изд-во Кемеровского ГСХИ, 2018. С. 361–364.
7. *Филонова Н.Н., Садыгова М.К., Яценко С.В.* Разработка рецептуры хлеба с использованием пайзовой муки для повышения качества хлебобулочных изделий // Известия вузов. Пищевая технология. 2019. № 1 (367). С. 30–34.
8. *Филонова Н.Н., Яценко С.В.* Использование пайзовой муки в технологии хлебобулочных изделий на примере хлеба Паляница Украинская // Развитие АПК на основе принципов рационального природопользования и применения конвергентных технологий: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., проведенной в рамках Междунар. науч.-практ. форума, посвящ. 75-летию образования Волгоград. гос. аграр. ун-та (Волгоград, 30 января – 1 февраля 2019 г.). Волгоград: Изд-во Волгоградского ГАУ, 2019. Т. 2. С. 17–23.
9. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. URL: https://studme.org/232726/matematika_himiya_fizik/ortogonalnyy_tsentralnyy_kompozitsionnyy_plan (дата обращения: 10.05.2020).

Literatura

1. *Tarasenko N.A., Baranova Z.A.* Sovremennye issledovaniya v nutriciologii i profilaktike neracional'nogo pitaniya // Izvestiya vuzov. Pishhevaya tehnologiya. 2016. № 4 (352). S. 6–10.
2. *Korzun O.S. i dr.* Vozdelyvanie prosovidnyh kul'tur v Respublike Belarus'. Grodno: Izd-vo GGAU, 2011. 189 s.
3. *Sadygova M.K., Bashinskaja O.S., Kondrashova A.V. i dr.* Bezopasnost' i kachestvo regional'nogo syr'ja dlja proizvodstva produktov dlja zdorovogo pitaniya // XXI vek:

- itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2018. T. 7, № 3 (43). S. 70–75.
4. Jacenko S.V., Sadygova M.K. Primenenie pajzovoj muki v tehnologii hlebobulochnyh izdelij s prolongirovannym srokom // *Alleja Nauki*. 2018. T. 3, № 8 (24).
 5. Jacenko S.V., Sadygova M.K., Filonova N.N. Perspektivy primeneniya pajzovoj muki v tehnologii muchnyh konditerskih izdelij // *Innovacionnye tehnologii v pishhevoj promyshlennosti: nauka, obrazovanie i proizvodstvo: mat-ly V Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Voronezh: Izd-vo VGUIT, 2018. S. 127–131.*
 6. Jacenko S.V., Sadygova M.K., Filonova N.N. Vlijanie pajzovoj muki na biotehnologicheskie svojstva hlebopekarnogo polufabrikata // *Sovremennye tendencii sel'skohozjajstvennogo proizvodstva v mirovoj jekonomike: mat-ly XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Kemerovo: Izd-vo Kemerovskogo GSHI, 2018. S. 361–364.*
 7. Filonova N.N., Sadygova M.K., Jacenko S.V. Razrabotka receptury hleba s ispol'zovaniem pajzovoj muki dlja povysheniya kachestva hlebobulochnyh izdelij // *Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija*. 2019. № 1 (367). S. 30–34.
 8. Filonova N.N., Jacenko S.V. Ispol'zovanie pajzovoj muki v tehnologii hlebobulochnyh izdelij na primere hleba Paljanica Ukrainskaja // *Razvitie APK na osnove principov racional'nogo prirodopol'zovanija i primeneniya konvergentnyh tehnologij: mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., provedennoj v ramkah Mezhdunar. nauch.-prakt. foruma, posvjashh. 75-letiju obrazovanija Volgograd. gos. agrar. un-ta (Volgograd, 30 janvarja – 1 fevralja 2019 g.)*. Volgograd: Izd-vo Volgogradskogo GAU, 2019. T. 2. S. 17–23.
 9. Teorija planirovanija jeksperimenta i analiz statisticheskikh dan-nyh. URL: https://studme.org/232726/matematika_himiya_fizik/ortogonalnyy_tsentralnyy_kompozitsionnyy_plan (data obrashhenija: 10.05.2020).

