DOI 10.21603/2074-9414-2018-1-99-107
УДК 664.788

ПЛЮЩЕНИЕ ЗЕРНА АМАРАНТА НА ВАЛЬЦОВОМ СТАНКЕ

Н. А. Шмалько[1, *], С. О. Смирнов[2]

[1]*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, 2*

[2]*ФГБНУ «Научно-исследовательский институт пищеконцентратной промышленности и специальной пищевой технологии», 142718, Россия, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Измайлово, 22*

**e-mail: na.shmalko@yandex.ru*

Дата поступления в редакцию: 12.01.2018
Дата принятия в печать: 16.03.2018

© Н. А. Шмалько, С. О. Смирнов, 2018

Аннотация. Статья посвящена вопросу разработки способа плющения зерна амаранта на вальцовом станке. В практике мукомольного производства процесс переработки традиционного зернового сырья направлен на разделение главных анатомических частей зерна для составления основного продукта и удаления нежелательного. Актуальной является разработка способов измельчения зерна на вальцовом станке с целью получения продуктов с заданным химическим составом и свойствами на основе формирования стабильных потоков продуктов размола из различных анатомических частей зерновки. Зерновой амарант отличается высокой питательной ценностью по качеству белка и проявляет функциональные и фармакологические свойства. Продукты его размола различаются по пищевой ценности в зависимости от содержания анатомических частей зерновки, основная область их применения отнесена к производству аглютеновых и мучных изделий. При разработке рационального способа измельчения зерна амаранта для разделения на анатомические части и получения целевых продуктов впервые применена методика изучения деформаций сжатия зерновки при плющении в межвальцовом зазоре. Объектом разрушения послужила фракция очищенного зерна амаранта одной крупности. Анализ процесса разрушения зерновок амаранта при плющении валками в диапазоне влажности от 9,5 до 15 % показывает наличие характерной ступенчатости для кривой трехфазного процесса разрушения продовольственного зерна при деформации сжатия. Процесс деформирования зерна амаранта при сжатии включает различные по своей природе фазы, начиная от фазы преобладания упругих деформаций с выкрошиванием зародыша, фазы пластических деформаций с обработкой крахмального перисперма и разрушения образца. В результате исследований установлена принципиальная возможность разделения зерна амаранта на анатомические части путем плющения с выделением зернопродуктов, ценных в пищевом отношении, предназначаемых для функционального питания и традиционного хлебопекарного производства.

Ключевые слова. Зерно амаранта, плющение, вальцовый станок, зернопродукты

Для цитирования: Шмалько, Н. А. Плющение зерна амаранта на вальцовом станке / Н. А. Шмалько, С. О. Смирнов // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 1. – С. 99–107. DOI: 10.21603/2074-9414-2018-1-99-107.

AMARANTH GRAIN PROCESSING IN A GRAIN ROLLER MILL

N.A. Shmalko[1, *], S.O. Smirnov[2]

[1]*Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russia*

[2]*Research Institute food concentrates industry and special food technology, 22, Izmaylovo, Leninskiy district, Moscow region, 142718, Russia*

**e-mail: na.shmalko@yandex.ru*

Received: 12.01.2018
Accepted: 16.03.2018

© N.A. Shmalko, S.O. Smirnov, 2018

Abstract. The article is devoted to the development of the method for amaranth grain grinding in a grain roller mill. In flour production practice the process of traditional grain raw material processing is aimed at sorting the main anatomical parts of the grain to compose the main product and remove unsuitable parts. It is essential to develop grain grinding methods using grain roller mill to obtain products with desired chemical composition and properties based on the establishing of the stable streams of reduction products obtained from different anatomical parts of the grain. Amaranth grains have high nutritional value with regard to protein value. Besides, they show functional and pharmacological properties. Its reduction products have different nutritional value depending on the grain anatomical parts content. Their main application field is production of baked and gluten-free goods. The author has used the procedures which allowed to study grain compression strain during processing in the roll space for the first time while developing a reasonable way of amaranth grain grinding to sort it into anatomical parts and obtain final products. Fraction of one size amaranth clean grain was subject to grinding. The analysis of amaranth grain destruction process during processing between the rollers at humidity from 9.5 to 15% demonstrates that there are indicators of gradation on the curve showing three-phase

destruction process of food-grade grain at compressive strain. Amaranth grain deformation process during compression includes phases of different nature starting with the phase when elastic strain prevails and corcule is crushed up to the phase when there are plastic deformations when starchy perisperm is processed and the sample is crushed. As a result of the research the author determined an essential possibility of amaranth grain sorting into anatomical parts by means of rolling with production of cereal products valuable from the nutritional point of view which will further be used for functional nutrition and in traditional bakery.

Keywords. Amaranth grain, rolling, roller mill, cereal products

For citation: Shmalko N.A., Smirnov S.O. Amaranth Grain Processing in a Grain Roller Mill. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2018, vol. 48, no. 1, pp. 99–107 (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2018-1-99-107.

Введение

Процесс переработки зернового сырья направлен на разделение главных анатомических частей зерна для составления основного продукта и удаления нежелательного. В практической технологии учитывается общее анатомическое строение, форма и особенности свойств частей зерна, подлежащих разделению, степень связи между анатомическими частями, подлежащими разделу, особенности расположения зародыша и глубина его проникновения в эндосперм, наличие, глубина и конфигурации бороздки у зерновок злаковых. Актуальной является разработка способов измельчения зерна на вальцовом станке, в том числе путем плющения, с целью получения продуктов с заданным химическим составом и свойствами на основе формирования стабильных потоков продуктов размола из различных анатомических частей зерновки [1].

Процесс плющения является распространенной технологической операцией на зерноперерабатывающих предприятиях. Он заключается в том, что исходное сырье подвергается механическому воздействию за счет воздействия деформаций сжатия между двумя движущимися криволинейными поверхностями с определенной и (или) заданной шероховатостью. В каждом конкретном зерноперерабатывающем производстве цели плющения зерна различны. В мукомольном производстве плющение зерна может применяться перед I драной системой в качестве предсистемы. Подобная операция используется в сортовых хлебопекарных помолах пшеницы по сокращенной схеме и при односортном 63%-ном помоле ржи в сеяную муку. В крупяном производстве операция плющения используется в технологии производства зерновых хлопьев. Производство комбикормов на основе плющения зерна с предварительной водно-тепловой обработкой приводит к повышению питательной ценности комбикормов.

Основной машиной для плющения в зерноперерабатывающей промышленности является вальцовый станок, основные рабочие органы которого − вальцы имеют микрошероховатую поверхность и вращаются навстречу друг другу с определенной скоростью. Такая конструкция позволяет производить первичное разрушение зерна путем деформации сжатия и получать заданный продукт без образования отдельных раздробленных частиц [2].

Плющение зерна или его частиц в вальцовом станке происходит в клиновидном пространстве, постепенно сужающемся книзу, образованном двумя цилиндрическими поверхностями внешнего касания. Рабочими органами вальцового станка являются два цилиндрических вальца, вращающихся с различными скоростями навстречу вдруг другу. Разрушение зерна начинается несколько выше линии, соединяющей центры вальцов, причем медленновращающийся валец, обычно нижний, как бы поддерживает зерно при воздействии на него поверхности верхнего, быстровращающегося вальца. Зерно или его частицы, попав в зону измельчения, подвергаются одновременно деформации сжатия вследствие постепенно уменьшающегося расстояния между поверхностями вальцов и сдвига за счет разности скоростей вальцов. Такой характер воздействия рабочих органов вальцового станка на измельчаемые продукты обеспечивает при плющении разворачивание целых зерновок с минимальным образованием мелких оболочечных частиц.

Результатом плющения зерна является решение технологической задачи деления зерновки на анатомические части по одной или нескольким границам разделения с большей или меньшей четкостью для дальнейшего целевого их использования. Для разрушения тела зерновки на анатомические части прилагается разрушающее усилие величиной, превышающей силу межмолекулярного сцепления и притяжения между частицами. Работа в данном случае расходуется на преодоление внутренних сил, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств разрушаемых материалов и характера приложения разрушающих усилий [3].

Сведения о зерновом амаранте [4, 5] указывают на его высокую питательную ценность, в том числе по качеству протеина [6], по сравнению с истинными злаками. Его относят к источникам сбалансированных пищевых составов и продуктов, проявляющих функциональные свойства и фармакологическую активность. К преимуществам для здоровья человека при введении зерна амаранта в пищу относят снижение уровня холестерина и глюкозы в крови, стимулирование иммунной системы, противоопухолевое действие, повышение гипертонического давления и снижение анемии [7–9].

Продукты размола зерна амаранта различаются по пищевой ценности и антиоксидантной активности в зависимости от содержания анатомических частей зерновки [10]. Клинически показано применение продуктов размола зерна амаранта в аглютеновых [11–14] и мучных изделиях [15].

Для проведения лабораторного размола зерна амаранта установлена возможность использования вальцового станка при проведении предварительного увлажнения зерновой массы от 11 до 18,5 %. Оптимальным диапазоном изменения влажности зерна амаранта является 11–15,5 % для получения муки с заданным содержанием полифенолов. В результате обработки количество удаляемой семенной оболочки амаранта повышается от 12,91 до 38,33 %, обеспечивая улучшение условий размола [16]. С другой стороны, продукты размола зерна амаранта, содержащие различные анатомические части, отличаются по гидрофильной способности и вязкости крахмала. Так, во фракции зерна, содержащей семенную оболочку, наблюдается ухудшение условий и повышение температуры клейстеризации крахмала, по сравнению с фракцией крахмалистой муки, выделяемой из центральной части зерновки. Наименьшая вязкость крахмала наблюдается в продуктах размола при влагосодержании зерна амаранта в 14–16 % [17].

Однако указанные способы измельчения зерна амаранта предусматривают получение преимущественно неочищенных от посторонних примесей и высокозольных частиц различных видов низкосортной муки и отрубей, что пригодно для целей обогащения или последующего выделения из них масла амаранта [18], ограничивая их использование в традиционном хлебопекарном производстве.

Целью работы является разработка способа плющения зерна амаранта на вальцовом станке для получения зернопродуктов на основе принципа разделения анатомических частей зерновки.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования послужило зерно амаранта сорта Ультра *A. hybridus* L., очищенное с помощью пневмоклассификатора с замкнутым циклом воздуха ЗЦВ [19]. Зерновой амарант, относимый по ГОСТ ISO 5526-2015 «Зерновые, бобовые и другие продовольственные зерновые культуры. Номенклатура» к продовольственным культурам, существенно отличается от злаков анатомическим строением зерновки и массовым соотношением ее составных частей (табл. 1). С уменьшением геометрических размеров зерновки амаранта (табл. 2) возрастает относительное содержание оболочек с алейроновым слоем и зародыша, а количество крахмалистого перисперма снижается при возрастании удельной поверхности, что обычно затрудняет технологическую переработку зерновой массы.

Для теоретического и практического изучения процесса сжатия зерна в процессе плющения рекомендуется использовать вальцовый станок, в котором зерновой материал обрабатывается в клиновидном зазоре между двумя валками, вращающимися навстречу друг другу с одинаковыми скоростями [20].

В данной работе впервые применена методика ВНИИЗ, включающая определение напряжений и относительных деформаций зерновки в межвальцовом зазоре вальцового станка при плющении на специальном стендовом устройстве, кинематическая схема которого приведена на рис. 1. На расчетной схеме стендового устройства (рис. 2) горизонтальные составляющие X_i силы T (Н) взаимодействия зерновки с вальцами определяют в ней величину деформаций сжатия и напряжения.

Таблица 1 – Соотношение анатомических частей в зерновке амаранта

Table 1 – Anatomic parts ratio in amaranth caryopsis

Сход с сита, № мм	Толщина оболочки с алейроновым слоем, мкм	Содержание, %					
		перисперм	эндосперм	зародыш	оболочки		
					плодовые	семенные	алейроновый слой
1,6	35	58,7	3,4	27,4	2,6	2,2	5,7
1,4	34	57,8	3,6	27,9	2,8	2,0	5,9
1,2	31	56,7	4,1	28,5	3,0	1,6	6,1
1,0	31	56,3	4,5	28,8	3,0	1,1	6,3
0,85	28	55,4	4,9	29,2	3,2	0,8	6,5
0,67	25	54,6	5,2	29,6	3,3	0,6	6,7

Таблица 2 – Геометрическая характеристика зерна амаранта

Table 2 – Amaranth caryopsis geometric characteristics

Сход с сита №, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Объем, мм^3	Площадь поверхности, мм^2	Удельная поверхность, м^2/кг
1,6	1,73	1,64	1,21	1,66	6,77	354
1,4	1,64	1,42	1,12	1,37	5,96	377
1,2	1,40	1,31	1,04	1,01	4,93	414
1,0	1,24	1,10	0,96	0,81	4,19	446
0,85	1,06	0,94	0,89	0,71	3,84	468
0,67	0,80	0,71	0,62	0,61	3,47	495
Исходное зерно	1,12	1,01	0,90	0,77	4,06	456

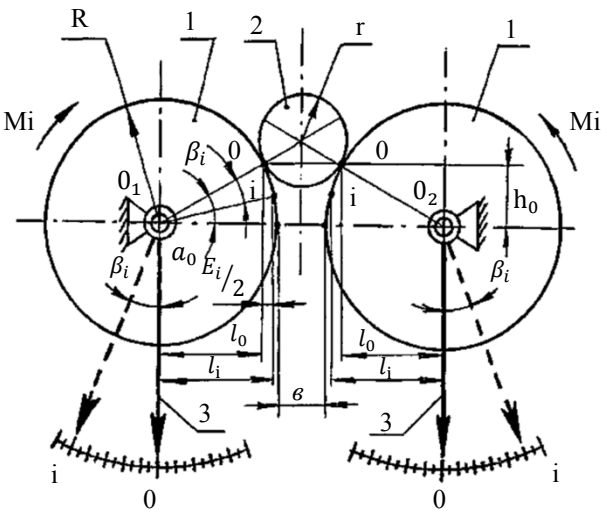

Рисунок 1 – Кинематическая схема устройства для определения деформации и перемещения зерновки амаранта в межвальцовом зазоре: *1* – вальцы; *2* – зерновка; *3* – указатели угловых перемещений

Figure 1 – Kinematic structure diagram for determining deformation and displacement of amaranth grains in the roll space: *1* – rollers; *2* – grain; *3* – angular displacement indicators

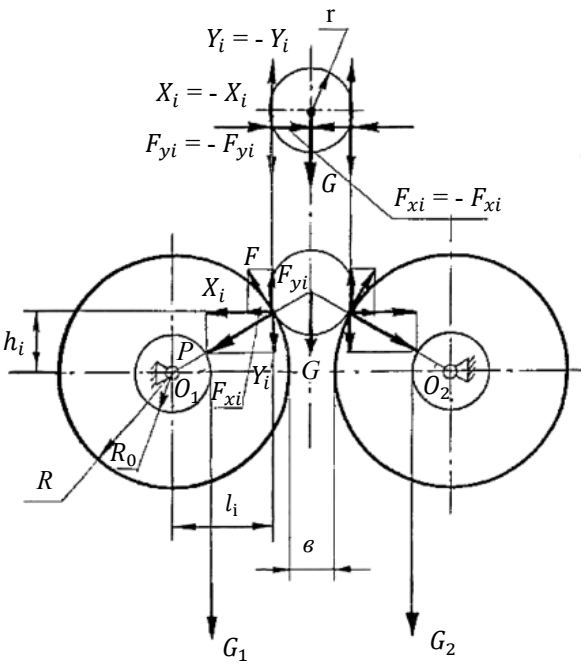

Рисунок 2 – Схема сил взаимодействия зерновки амаранта с вальцами

Figure 2 – Scheme of interaction forces between amaranth grains and rollers

В стендовом устройстве зерновку амаранта радиусом *r* (м) размещают в заданном зазоре *b* (м) и нагружают вальцы с помощью грузов G_1 (кг) и G_2 (кг), расчет усилий и перемещений в котором осуществляют с помощью формул (1–8).

Предельное значение напряжения сжатия зерновки амаранта в межвальцовом зазоре, при котором происходит ее разрушение, равно:

$$|\sigma_{сж}| = P_i : S, \quad (1)$$

где P_i – сила, Н;

S – площадь зерновки, м^2.

Суммарный момент нагружения вальцов определяется как:

$$\sum \mathrm{M}_0 = -P_i \cdot f_k \cdot r_n - P_i \cdot f_c \cdot R - M_{xx} + G_i \cdot R_0, \quad (2)$$

где $(P_i \cdot f_k \cdot r_n)$ – момент сопротивления в подшипнике, Н·м;

$(P_i \cdot f_c \cdot R)$ – момент споротивления от силы трения при втягивании частицы в зазор, Н·м;

M_{xx} – момент сопротивления вальца на холостом ходу, Н·м;

R – радиус вальца (0,1 м);

f_c – коэффициент трения покоя зерновки амаранта по стали (0,3);

r_n – радиус подшипника, м;

Горизонтальная сила, Н, определяющая деформацию сжатия зерновки, равна:

$$P_{xi} = X_i = P_i \cdot \cos(\alpha_0 - \beta_i). \quad (3)$$

Вертикальная сила, Н, определяющая деформацию сжатия зерновки, равна:

$$P_{yi} = Y_i = P_i \cdot \sin(\alpha_0 - \beta_i). \quad (4)$$

Расчет величины деформации E_i и плечей h_i и l_i производится по формулам:
– абсолютная деформация, м:

$$E_i/_2 = (1/_{2\,.\,r}) \cdot R[\cos(\alpha_0 - \beta_i)] - R \cdot cos\ \alpha_0, \quad (5)$$

– относительная деформация:

$$E_i = 2 \cdot R[\cos(\alpha_0 - \beta_i) - cos\alpha_0] \cdot 1/_{2\,.\,r} = (R/_r) \cdot$$

$$\cdot (cos\ \alpha_0 \cdot \cos\beta_i + \sin\alpha_0 \cdot \sin\beta_i - \cos\alpha_0), \quad (6)$$

где

$$\cos\alpha_0 = \left(R + b/_2\right)/(R + r) \to \alpha_0;$$

$$\sin\alpha_0 = \sqrt{1 - cos^2\alpha_0};$$

$$h_0 = R \cdot \sin\alpha_0;\ l_0 = R \cdot \cos\alpha_0;$$

$$h_i = R \cdot \sin(\alpha_0 - \beta_i) =$$

$$= R \cdot (sin\ \alpha_0 \cdot cos\beta_i - cos\alpha_0 \cdot sin\beta_i);$$

$$l_i = R \cdot cos(\alpha_0 - \beta_i) =$$

$$= R \cdot (cos\alpha_0 \cdot cos\beta_i + sin\alpha_0 \cdot sin\beta_i).$$

Момент холостого хода равен:

$$M_{xx} = R_0 \cdot T, \quad (7)$$

где R_0 – радиус шкива, м (0,047);

T – сила преодоления сопротивлению вращения вальца на холостом ходу, Н.

Коэффициент трения качения (0,011) рассчитывается как:

$$f_k = \frac{M_{xx}}{(Q \cdot d/_2)}, \quad (8)$$

где Q – масса вальца, кг (42,6);

d – средний диаметр подшипника, м (0,09).

Для проведения опыта с зерновками амаранта производили из партии зерна отбор трех навесок массой 0,1 кг каждая и сортирование их по крупности. Зерно, относимое к сходу сит с размерами ячеек 1,6; 1,4; 1,2; 1,0; 0,85 и 0,67 мм, классифицировали по шести фракциям, проход сита с размерами ячеек 0,67 мм при проведении опыта не использовали.

Среднее усилие разрушения зерна каждой фракции P_{cpi} (i = 1, 2, …, 6) определяли как среднее арифметическое усилие разрушения 10 или 20 штук зерен одной крупности, величину данного показателя рассчитывали по формуле:

$$\mathrm{P}_{\text{ср.разр}} = \frac{\sum_i^k P_{\text{ср}i} \cdot G_i}{\sum_i^k G_i}, \quad (9)$$

где P_{cpi} – среднее усилие разрушения зерен одной крупности (фракции), Н;

G_i – содержание зерен одной крупности в навеске, %.

С учетом процентного содержания каждой фракции зерна в навеске предельную относительную ошибку определяли по формуле:

$$\delta = \frac{\sum_i^k (\Delta_i \cdot G_i)}{\sum_i^k (P_{\text{ср}i} \cdot i)}, \quad (10)$$

где Δ_i – абсолютная ошибка или предельное отклонение среднего арифметического значения величины усилия разрушения зерна одной крупности (фракции):

$$\Delta_i = \sqrt{\frac{\sigma_i^2 \cdot t_\alpha^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_n^m \left(P_n - P_{\text{ср}i}\right)^2 \cdot t_\alpha^2}{n(n+1)}}, \quad (11)$$

где n – количество зерен одной крупности, т. е. фракций, отобранных для испытаний;

t_α – нормированное отклонение малой выборки [7].

Результаты и их обсуждение

Проведение экспериментов показало наличие характерной для кривых трехфазного процесса разрушения зерна пшеницы при деформации по З. Д. Гончаровой ступенчатости при плющении валками зерновок амаранта. Выбор диапазона влажности зерна амаранта при плющении для достижения пластичности обоснован литературными данными [16]. Целостность эндосперма в зерновке сохраняется при усилии сжатия с относительной деформацией от 80 до 90 %, в результате чего повреждается семенная оболочка и зародыш при сохранении связи между анатомическими частями зерна, а измельчение перисперма зерна амаранта характеризуется вязким разрушением с образованием хлопьев. Результаты стендовых испытаний приведены в табл. 3.

Относительная ошибка параметра среднего усилия разрушения зерен одной крупности с надежностью 0,9 была определена для двух вариантов: фракции с содержанием зерна одной крупности в навеске до 10 %, от 10 до 30 % и более 30 % с отбором для проведения испытаний 10, 15 и 20 штук и фракции при том же содержании зерна одной крупности в навеске с отбором по 10 штук для проведения опыта. Относительная ошибка среднего усилия разрушения зерна амаранта в первом варианте, где фракция 70 штук, получена равной $\delta = (17{,}28 : 362{,}3) \cdot 100\ \% = 4{,}7\ \%$, во втором варианте, где фракция 50 штук – $\delta = (20{,}38 : 368{,}7) \cdot 100\ \% = 5{,}5\ \%$.

Таблица 3 – Данные экспериментальных измерений для одной зерновки амаранта

Table 3 – Experimental measurements data for one amaranth grain

Влажность, %	Зазор между валками, м	№ п/п	G_i, кг	β_i^0	P_i, Н	E_i, %	X_i, кг	σ_i, кПа
9,5	0,05	0	0,450	0	0	0	0	0
		1	0,795	0	0	0	0	0
		2	1,095	0,5	2,077	24	2,069	2,63
		3	1,395	2,0	3,043	56	3,037	3,87
		4	1,695	2,5	4,009	70	4,003	5,10
		5	1,995	3,0	4,975	76	4,970	6,33
		6	2,295	3,5	5,942	84	5,938	7,56
		7	2,595	4,0	6,907	88	6,904	8,79
12	0,05	0	0,450	0	0	0	0	0
		1	0,795	0	0	0	0	0
		2	0,995	0,5	1,755	24	1,748	2,23
		3	1,195	1,5	2,399	48	2,393	3,05
		4	1,395	2,0	3,043	56	3,037	3,87
		5	1,595	2,5	3,687	70	3,682	4,69
		6	1,795	2,5	4,331	76	4,325	5,51
		7	1,995	3,0	4,975	84	4,970	6,33
		8	2,195	3,5	5,619	88	5,616	7,15
15	0,05	0	0,450	0	0	0	0	0
		1	0,795	1,0	1,111	32	1,107	1,41
		2	0,995	1,5	1,755	48	1,750	2,23
		3	1,195	2,0	2,399	56	2,394	3,05
		4	1,395	2,5	3,043	70	3,039	3,87
		5	1,595	3,0	3,687	76	3,683	4,69
		6	1,795	3,0	4,331	76	4,327	5,51
		7	1,995	3,5	4,975	84	4,972	6,33

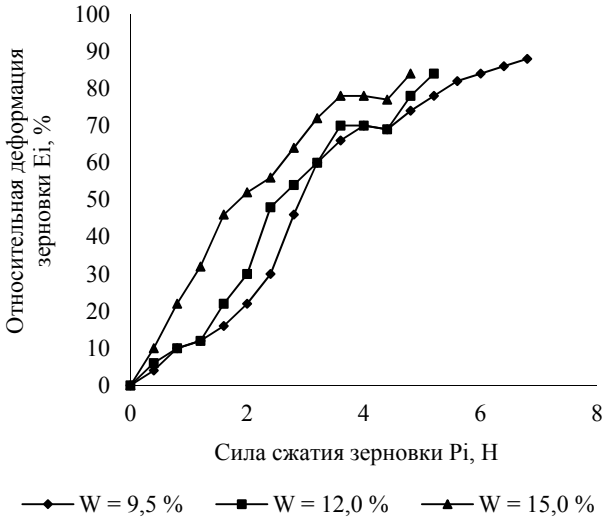

Рисунок 3 – Кривые разрушения зерновки амаранта при сжатии в межвальцовом зазоре

Figure 3 – Amaranth grain destruction curves during pressing in the roll space

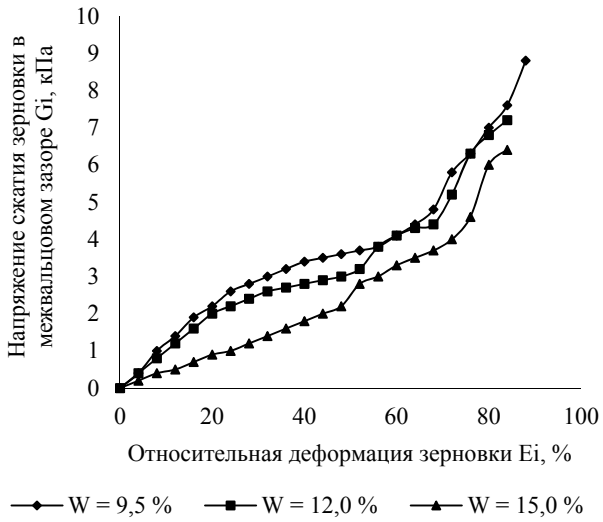

Рисунок 4 – Диаграмма напряжений в зерновке при межвальцовом зазоре 0,05 мм

Figure 4 – Stress-strain curve for grain when the roll space equals 0,05 mm

Каждая кривая разрушения зерновки амаранта на рис. 3 имеет наклонные и горизонтальные участки, обусловливающие характер изменений структурно-механических свойств зерна при сжатии.

Экспериментально установлено, что увлажнение зерна амаранта до 9,5 % не приводит в полной мере к проявлению в зерновке при сжатии необходимой упругой деформации для последовательного отделения анатомических частей. На диаграмме разрушения при сжатии зерно амаранта влажностью 9,5 % проявляет свойства упругого тела при нагрузке ступенчато: от 0 до 0,8 Н и от 0,8 до 1,2 Н. На участке преобладания пластических деформаций зерно данной влажности испытывает силу сжатия от 1,2 до 4,4 Н, а на участке начала разрушения образца от 4,4 Н и выше.

Расчет относительных деформаций зерновок амаранта (рис. 4) показывает, что при влажности зерна 9,5 % фракция сжатия испытывает не более 10 % упругих деформаций, при влажности зерновок 12 и 15 % соответственно не менее 20 и 48 % при одинаковом напряжении сжатия. Из этого следует, что увлажненная до 15,0 % зерновка амаранта при

одной и той же величине относительной деформации испытывает напряжение сжатия в 1,5 раза меньшее, чем зерновка, увлажненная до 9,5 %, и в 1,3 раза, чем зерновка, увлажненная до 12,0 %.

Зерно влажностью 12 % при сжатии вначале проявляет свойства упругого тела при нагрузке в диапазонах от 0 до 1,2 Н и от 1,2 до 2 Н, далее проявляет свойства пластического тела при нагрузке в диапазоне от 2 до 3,6 Н, а на горизонтальном участке при силе сжатия от 3,6 до 4,4 Н отличается постоянной пластичностью за счет удаления зародышевой части и обработки преимущественно крахмалистого перисперма.

Зерно влажностью 15 % при сжатии вначале проявляет свойства упругого тела при нагрузке в диапазоне от 0 до 1,6 Н, далее проявляет свойства пластического тела при силе сжатия в диапазоне от 1,6 до 3,6 Н по причине более быстрого выкрошивания зародыша, а на горизонтальном участке от 3,6 до 4,4 Н отличается так же, как и при сжатии зерна влажностью 12 %, постоянной пластичностью за счет обработки преимущественно крахмалистого перисперма.

Установлено, что при влажности зерна 9,5 % в диапазоне изменения напряжения сжатия G_i от 0 до 2,2 кПа зерновки амаранта испытывают деформации упругости на участке кривой, подчиняющейся линейной зависимости $y = 0{,}1136x + 0{,}0476$ при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}9899$.

При влажности зерна 12,0 % в диапазоне изменения напряжения сжатия G_i от 0 до 2,0 кПа зерновки амаранта испытывают деформации упругости на участке кривой, подчиняющейся линейной зависимости $y = 0{,}0986x + 0{,}0476$ при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}9953$.

При влажности зерновой массы 15,0 % в диапазоне изменения напряжения сжатия G_i от 0 до 2,2 кПа зерновки испытывают деформации упругости на участке кривой, подчиняющейся линейной зависимости $y = 0{,}0453x - 0{,}0302$ при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}9957$.

По литературным данным [16] увлажнение зерна свыше 15 % нежелательно, так как при влажности зерна амаранта более 16,5 % в ходе плющения измельчаемая масса нагревается свыше 45 °С и налипает на вальцы станка вследствие частичной клейстеризации крахмала, что оказывает отрицательное влияние на качество продуктов плющения: зерно плющенное, хлопья перисперма и крупку зародышевую. Химический состав полученных продуктов плющения зерна амаранта приведен в табл. 4.

Наиболее ценным продуктом плющения зерна амаранта по содержанию белка, жира, клетчатки, минеральных веществ и витаминов для функционального питания является крупка зародышевая, выделяемая из зерновки амаранта при сжатии в области упругих деформаций. Перспективными для традиционного хлебопечения видами сырья могут выступать амарант плющенный и хлопья перисперма, отличающиеся повышенным содержанием крахмала и низкой зольностью.

Таким образом, применяемая в работе методика ВНИИЗ, включающая определение напряжений и относительных деформаций зерна в межвальцовом зазоре вальцового станка при плющении на специальном стендовом устройстве, позволила изучить особенности процесса разрушения зерновок амаранта при сжатии в заданном диапазоне влажности.

Практическим результатом проведенных исследований по изучению процесса плющения зерна амаранта на вальцовом станке является установление принципиальной возможности его разделения на анатомические части с последующим формированием стабильных потоков зерно-продуктов, ценных в пищевом отношении, в том числе для традиционного хлебопекарного производства. Предложенный способ рекомендуется для проектирования технологического процесса разделения зерновки амаранта на анатомические части с целью его промышленной применимости.

Таблица 4 – Химический состав и энергетическая ценность продуктов плющения зерна амаранта [18]

Table 4 – Chemical composition and energy value of amaranth grain products obtained after rolling [18]

Наименование сырья	Белок	Жир	Углеводы усвояемые	Клетчатка	Зола	Минеральные вещества						Витамины			Энергетическая ценность
						натрий	калий	кальций	магний	фосфор	железо	тиамин	рибофлавин	пиридоксин /токоферол	
	г в 100 г продукта					мг в 100 г продукта									ккал
Амарант плющенный	17,3	7,8	53,4	6,4	2,6	92	487	275	176	540	57	5,42	2,85	2,4/13,5	378
Хлопья перисперма	6,6	1,9	70,4	2,6	1,2	74	216	131	106	364	36	3,54	1,45	1,9/2,8	335
Крупка зародышевая	36,3	17,8	11,8	7,1	5,7	117	769	482	279	879	84	8,67	5,75	3,0/32,4	381

Список литературы

1. Актуальное направление развития мукомольной отрасли / Г. Н. Панкратов [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. – № 4. – С. 29–31.

2. Злочевский, В. Л. Устройство для плющения зерна маятникового типа / В. Л. Злочевский, В. Ю. Чикина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 6 (56). – С. 57–62.

3. Наймушин, А. А. Модель размола зерна пшеницы, учитывающее его молекулярное строение / А. А. Наймушин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 10 (108). – С. 110–115.

4. Caselato-Sousa, V. M. State of Knowledge on Amaranth Grain: a Comprehensive Review / V. M. Caselato-Sousa, J. Amaya-Farfán // Journal of Food Science. – 2012. – Vol. 77, № 4. – P. 93–104. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x.

5. Amaranth seeds and products − the source of bioactive compounds / D. Ogrodowska [et al.] // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2014. – Vol. 64, № 3. – P. 165–170.

6. Proteins of amaranth (*Amarantus Spp.*), buckwheat (*Fagopyrum Spp.*), and quinoa (*Chenopodium Spp.*): A food science and technology perspective / F. Janssen [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2017. – Vol. 16, № 1. – P. 39–58. DOI: 10.1111/1541-4337.12240.

7. Tang, Y. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: A review / Y. Tang, R. Tsao // Molecular Nutrition and Food Research. – 2017. – Vol. 61, № 7. – 16 p. DOI: 10.1002/mnfr.201600767.

8. Barrio, D. A. Potential antitumor properties of a protein isolate obtained from the seeds of *Amaranthus mantegazzianus* / D. A. Barrio, M. C. Añón // European Journal of Nutrition. – 2010. – Vol. 49, № 2. – P. 73–82. DOI: 10.1007/s00394-009-0051-9.

9. Simulation of the effect of maize porridge fortified with grain amaranth or micronutrient powder containing NaFeEDTA on iron intake and status in Kenyan children / C. W. Macharia-Mutie [et al.] // Public Health Nutrition. – 2013. – Vol. 3, № 9. – P. 1605–1613. DOI: 10.1017/S1368980012005174.

10. Preparation of protein and mineral rich fraction from grain amaranth and evaluation of its functional characteristics / K. V. Preetham Kumar [et al.] // Journal of Cereal Science. – 2016. – Vol. 69. – P. 358–362. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.05.002.

11. Alvarez-Jubete, L. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients / L. Alvarez-Jubete, E. K. Arendt, E. Gallagher // International Journal of Food Sciences and Nutrition. – 2009. – Vol. 60, iss. 4. – P. 240–257. DOI: 10.1080/09637480902950597.

12. Inglett, G. E. Physical properties of gluten-free sugar cookies made from amaranth-oat composites / G. E. Inglett, D. Chen, S. X. Liu // LWT − Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 63, № 1. – P. 214–220. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.03.056.

13. Enrichment of gluten-free roll with amaranth and flaxseed increases the concentration of calcium and phosphorus in the bones of rats / H. Gambuś [et al.] // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2009. – Vol. 59, № 4. – P. 349–355.

14. Эффективность продуктов из амаранта в безглютеновом питании детей с непереносимостью глютена / И. А. Бавыкина [и др.] // Вопросы питания. – 2017. – Т. 86, № 2. – С. 91–99.

15. Жакатаева, А. Н. Санитарное и микробиологическое исследование хлеба с добавлением муки амаранта *A. cruentus* / А. Н. Жакатаева, Р. У. Уажанова // Вестник Алматинского технологического университета. – 2012. – № 6. – С. 63–66.

16. Evaluation of roller milling potential of amaranth grains / S. D. Sakhare [et al.] // Journal of Cereal Science. – 2017. – Vol. 73. – P. 55–61. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.11.006.

17. Effect of grain moisture content during milling on pasting profile and functional properties of amaranth fractions / K. V. Preetham Kumar [et al.] // Journal of Food Science and Technology-Mysore. – 2016. – Vol. 53. iss. 5. – P. 2434–2442. DOI: 10.1007/s13197-016-2226-8.

18. Амарант – продовольственная культура (происхождение, систематика, морфология, физиология, интродукция, возделывание, химический состав, сушка, хранение, переработка, применение) / Р. У. Уажанова [и др.]. – Краснодар : КубГТУ, 2016. – 348 с.

19. Шмалько, Н. А. Способ очистки зерна амаранта от примесей / Н. А. Шмалько, С. О. Смирнов // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – № 3. – С. 114–120. DOI: 10.21179/2074-9414-2017-3-114-120.

20. Чикина, Е. Ю. Энергия сжатия зерновки при плющении / Е. Ю. Чикина, В. Л. Злочевский // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 7 (81). – С. 93–96.

References

1. Pankratov G.N., Meleshkina E.P., Vitol I.S., Hadrokov R.H. Aktual'noe napravlenie razvitiya mukomol'noy otrasli [Storage and processing of agricultural products]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya* [Storage and processing of agricultural products], 2017, no. 4, pp. 29–31.

2. Zlochevskiy V.L., Chikina V.Ju. Ustroystvo dlya plyushcheniya zerna mayatnikovogo tipa [A device for crushing grain]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2009, no. 6(56), pp. 57–62.

3. Najmushin A.A. Model' razmola zerna pshenitsy, uchityvayushchee ego molekulyarnoe stroenie [Model grinding wheat, taking into account its molecular structure]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2013, no. 10(108), pp. 110–115.

4. Caselato-Sousa V.M., Amaya-Farfán J. State of Knowledge on Amaranth Grain: a Comprehensive Review. *Journal of Food Science*, 2012, vol. 77, no. 4, pp. 93–104. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x.

5. Ogrodowska D., Zadernowski R., Czaplicki S., Wronowska B., Derewiaka D. Amaranth seeds and products − the source of bioactive compounds. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2014, vol. 64, no. 3, pp. 165–170.

6. Janssen F., Pauly A., Rombouts I., et al. Proteins of amaranth (*Amarantus Spp.*), buckwheat (*Fagopyrum Spp.*), and quinoa (*Chenopodium Spp.*): A food science and technology perspective. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 39–58. DOI: 10.1111/1541-4337.12240.

7. Tang Y., Tsao R. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: A review. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2017, vol. 61, no. 7, 16 p. DOI: 10.1002/mnfr.201600767.

8. Barrio D.A., Añón M.C. Potential antitumor properties of a protein isolate obtained from the seeds of amaranth mantegazzianus**.** *European Journal of Nutrition*, 2010, vol. 49, no. 2, pp. 73–82. DOI: 10.1007/s00394-009-0051-9.

9. Macharia-Mutie C.W., Omusundi A.M., Brouwer I.D., Mwai J.M., Mwangi A.M. Simulation of the effect of maize porridge fortified with grain amaranth or micronutrient powder containing NaFeEDTA on iron intake and status in Kenyan children. *Public Health Nutrition*, 2013, vol. 3, no. 9, pp. 1605–1613. DOI: 10.1017/S1368980012005174.

10. Preetham Kumar K.V., Dharmaraj U., Sakhare S.D., Inamdar A. Preparation of protein and mineral rich fraction from grain amaranth and evaluation of its functional characteristics. *Journal of Cereal Science*, 2016, vol. 69, pp. 358–362. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.05.002.

11. Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2009, vol. 60, iss. 4, pp. 240–257. DOI: 10.1080/09637480902950597.

12. Inglett G.E., Chen D., Liu S.X. Physical properties of gluten-free sugar cookies made from amaranth-oat composites. *LWT − Food Science and Technology*, 2015, vol. 63, no. 1, pp. 214–220. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.03.056.

13. Gambuś H., Wrona P., Pastuzka D., et al. Enrichment of gluten-free roll with amaranth and flaxseed increases the concentration of calcium and phosphorus in the bones of rats. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2009, vol. 59, no. 4, pp. 349–355.

14. Bavykina I.A., Zvyagin A.A., Miroshnichenko L.A., Gusev K.Ju., Zharkova I.M. Effektivnost' produktov iz amaranta v bezglyutenovom pitanii detey s neperenosimost'yu glyutena [Efficacy of amaranth products in gluten-free nutrition of children with gluten intolerance]. *Voprosy pitaniya* [Nutrition issues], 2017, vol. 86, no. 2, pp. 91–99.

15. Zhakataeva A.N., Uazhanova R.U. Sanitarnoe i mikrobiologicheskoe issledovanie khleba s dobavleniem muki amaranta *A. cruentus* [Sanitary and microbiological study of bread with the addition of amaranth flour *A. cruentus*]. *Vestnik Almatinskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Almaty Technological University], 2012, no. 6, pp. 63–66.

16. Sakhare S.D., Inamdar A., Preetham Kumar K.V., Dharmaraj U. Evaluation of roller milling potential of amaranth grains. *Journal of Cereal Science*, 2017, vol. 73, pp. 55–61. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.11.006.

17. Preetham Kumar K.V., Dharmaraj U., Sakhare S.D., Inamdar A. Effect of grain moisture content during milling on pasting profile and functional properties of amaranth fractions. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2016, vol. 53, iss. 5, pp. 2434–2442. DOI: 10.1007/s13197-016-2226-8.

18. Uazhanova R.U., Roslyakov Yu.F., Zharkova I.V., Shmal'ko N.A. *Amarant – prodovol'stvennaya kul'tura (proiskhozhdenie, sistematika, morfologiya, fiziologiya, introduktsiya, vozdelyvanie, khimicheskiy sostav, sushka, khranenie, pererabotka, primenenie).* [Amaranth is a food crop (origin, systematics, morphology, physiology, introduction, cultivation, chemical composition, drying, storage, processing, use)]. Krasnodar: KubGTU Publ., 2016. 348 p.

19. Shmal'ko N.A., Smirnov S.O. Sposob ochistki zerna amaranta ot primesey [Method of purification of amaranth grain from impurities]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2017, no. 3, pp. 114–120. DOI: 10.21179/2074-9414-2017-3-114-120.

20. Chikina E.Yu., Zlochevskiy V.L. Energiya szhatiya zernovki pri plyushchenii [The energy of compression of the grains during the compaction]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2011, no. 7(81), pp. 93–96.

Шмалько Наталья Анатольевна
канд. техн. наук, доцент института пищевой и перерабатывающей промышленности, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: +7 (861) 255-15-98, e-mail: na.shmalko@yandex.ru

Смирнов Станислав Олегович
заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт пищеконцентратной промышленности и специальной пищевой технологии», 142718, Россия, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Измайлово, 22, тел.: +7 (495) 549-34-57, e-mail: sts_76@bk.ru

Natal'ya A. Shmalko
Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Food Technology Institute, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russia, phone: +7 (861) 255-15-98, e-mail: na.shmalko@yandex.ru

Stanislav O. Smirnov
Associate Director for Research, Research Institute Food Concentrates Industry and Special Food Technology, 22, Izmaylovo, Leninskiy district, Moscow region, 142718, Russia, phone: +7 (495) 549-34-57, e-mail: sts_76@bk.ru