

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-162-170>

Поступила 17.11.2025

Поступила после рецензирования 17.04.2026

Принята в печать 21.04.2026

© Сотченко Д. Ю., Мартиросян В. В., Костюченко М. Н.,

Балуян Х. А., Шариков А. Ю., Жиркова Е. В., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПЫ ИЗ ЗЕРНА ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ДЛЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Сотченко Д. Ю.<sup>1,\*</sup>, Мартиросян В. В.<sup>1</sup>, Костюченко М. Н.<sup>1</sup>,  
Балуян Х. А.<sup>1</sup>, Шариков А. Ю.<sup>2</sup>, Жиркова Е. В.<sup>3</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Москва, Россия<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия<sup>3</sup> Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

*кукуруза, крупа,  
экструзия,  
экструдат,  
коэффициент  
расширения*

В работе представлены результаты исследований крупы из зерна гибридов кукурузы отечественной селекции (Белозерный 250, Белозерный 300, К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510): цветовые характеристики, гранулометрический состав, насыпная плотность, температура клейстеризации и вязкость крахмальной суспензии. Установлена повышенная насыпная плотность частиц из зерна гибридов кукурузы К 500, что свидетельствует о монолитном строении эндосперма. Отмечена повышенная вязкость суспензии крахмала из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 — 7012 сП, 5930 сП и 4871 сП соответственно. Это указывает на возможное превалирование молекул амилопектина в крахмале, что может обеспечить однородность микроструктуры экструзионных продуктов. Установлены критерии оценки экструзионного процесса — удельная механическая энергия и коэффициент расширения экструдата на обработку. Выработка крупы в двухшнековом экструдере с размером частиц 250–670 мкм из зерна гибрида кукурузы К 500 происходила при меньшем крутящем моменте ( $52 \pm 1\%$ ) и давлении в шнековой камере экструдера  $4,9 \pm 0,2$  МПа. Это обеспечило меньшую удельную энергию ( $0,174 \pm 0,003$  кВт·ч/кг) по сравнению с обработкой других образцов крупы кукурузы. Максимальный коэффициент расширения ( $12,0 \pm 0,2$ ) установлен для экструдата из данной крупы. Исследование показало целесообразность использования крупы из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510, которые характеризуются монолитным строением эндосперма, лучшими термодинамическими характеристиками крахмала при тепловом воздействии. Установлены высокие показатели коэффициента расширения экструдатов всех исследуемых фракций крупы из зерна гибрида кукурузы К 500, что указывает на целесообразность применения продуктов его переработки для экструзии.

Received 17.11.2025

Accepted in revised 17.04.2026

Accepted for publication 21.04.2026

© Sotchenko D. Yu., Martirosyan V. V., Kostyuchenko M. N.,

Baluyan Kh. A., Sharikov A. Yu., Zhirkova E. V., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

## STUDY OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CEREALS FROM GRAIN OF CORN HYBRIDS OF DOMESTIC BREEDING FOR EXTRUSION PROCESSING

Denis Yu. Sotchenko<sup>1,\*</sup>, Vladimir V. Martirosyan<sup>1</sup>, Marina N. Kostyuchenko<sup>1</sup>,  
Khachatur A. Baluyan<sup>1</sup>, Anton Yu. Sharikov<sup>2</sup>, Elena V. Zhirkova<sup>3</sup><sup>1</sup> Scientific Research Institute for the Baking Industry, Moscow, Russia<sup>2</sup> All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology — Subdivision of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia<sup>3</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

### KEYWORDS:

*corn, cereals, extrusion,  
extrudate, expansion  
coefficient*

### ABSTRACT

This paper presents the results of a study of groats from domestically bred corn hybrids (Belozerniy 250, Belozerniy 300, K 350, Yantarniy, K 500 and Mashuk 510): color characteristics, particle size distribution, bulk density, gelatinization temperature and starch suspension viscosity. An increased bulk density of particles from the grain of corn hybrid K 500 was found, indicating a monolithic endosperm structure. Increased viscosity of starch suspensions from the grain of corn hybrids K 350, K 500 and Mashuk 510 was noted — 7012 cP, 5930 cP and 4871 cP, respectively. This indicates the possible prevalence of amylopectin molecules in the starch, which can ensure the uniformity of the microstructure of extruded products. The criteria for evaluating the extrusion process were specific mechanical energy during processing and extrudate expansion coefficient. The production of groats in a twin-screw extruder with particle sizes of 250–670 μm from the grain of corn hybrid K 500 occurred at a lower torque ( $52 \pm 1\%$ ) and a pressure at screw chamber of  $4.9 \pm 0.2$  MPa, resulting in lower specific energy ( $0.174 \pm 0.003$  kW·h/kg) compared to the processing of other samples of corn groats. The maximum expansion coefficient ( $12.0 \pm 0.2$ ) was established for the extrudate from this cereal. The study demonstrated the feasibility of using groats from the grains of corn hybrids K 350, K 500 and Mashuk 510, which are characterized by a monolithic endosperm structure and better thermodynamic properties of starch under thermal exposure. High expansion coefficients of extrudates of all studied fractions of cereals from the grain of the corn hybrid K 500 were established, which indicates the feasibility of using its processed products for extrusion processing.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сотченко, Д. Ю., Мартиросян, В. В., Костюченко, М. Н., Балуян, Х. А., Шариков, А. Ю., Жиркова, Е. В. (2026). Исследование технологических свойств крупы из зерна гибридов кукурузы отечественной селекции для экструзионной обработки. *Пищевые системы*, 9(2), 162–170. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-162-170>

FOR CITATION: Sotchenko, D. Yu., Martirosyan, V. V., Kostyuchenko, M. N., Baluyan, Kh. A., Sharikov, A. Yu., Zhirkova, E. V. (2026). Study of technological properties of cereals from grain of corn hybrids of domestic breeding for extrusion processing. *Food Systems*, 9(2), 162–170. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-162-170>

## 1. Введение

Одной из наиболее продуктивных и перспективных зерновых культур в мире является кукуруза. Кукуруза (*Zea mays*) — широко возделываемая культура, она используется многими народами как один из основных ингредиентов в системе питания [1]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), в 2024 г. мировое производство зерна кукурузы составило 1218,2 млн т, которая возделывалась на площади 209,9 млн гектаров. В 2024 году кукуруза являлась второй по распространенности сельскохозяйственной культурой в мире, занимая 14,1 % от общей посевной площади [2].

В Российской Федерации в 2024 году на площади 2390,8 тыс. гектаров было выращено зерна кукурузы в количестве 13,9 млн т, что составило 3,8 % от общей площади возделывания сельскохозяйственных культур [3].

Увеличение производства зерновых культур, в том числе кукурузы, способствует расширению сырьевой базы для производства пищевых продуктов и кормов, что является одним из главных приоритетов в обеспечении продовольственной безопасности Российской Федерации. В последние годы наблюдается тенденция увеличения валового сбора зерна кукурузы, что свидетельствует о повышенном внимании со стороны сельхозпроизводителей к данной культуре.

В Российской Федерации существует несколько ведущих селекционно-семеноводческих организаций, занимающихся селекцией гибридов кукурузы, в том числе ФГБНУ ВНИИ кукурузы и ООО СП ССК «Кукуруза». Ими создано более 80 конкурентоспособных гибридов кукурузы различных групп спелости и направлений использования, которые широко возделываются на территории страны и ежегодно реализуются в объеме до 16 тыс. т семян. Помимо создания гибридов зернового и силосного направления ведется работа по селекции гибридов кукурузы для пищевых целей, а именно гибридов сахарной, лопающейся и белозерной кукурузы [4].

Продукты переработки зерна кукурузы (крупа, мука, крахмал, масло) являются одними из широко используемых ингредиентов, применяемых в производстве хлебобулочных, макаронных и кондитерских изделий. Наличие в продуктах переработки важных эссенциальных пищевых веществ — аминокислот, ненасыщенных жирных кислот, пищевых волокон, витаминов и минеральных элементов — обуславливает их применение в рецептурах обогащенной продукции [5].

Кукурузная мука отличается от пшеничной муки по внешнему виду и химическому составу. Мука из кукурузы, риса и амаранта относится к безглютеновым альтернативам пшеничной муке, что позволяет использовать ее в питании людей с целиакией [5–7]. Кукурузная мука в сравнении с пшеничной мукой легче усваивается в организме человека, стимулирует желчевыделение и перистальтику кишечника, нормализует внутренний микробиом, обладает дегидратическим (мочегонным) свойством, укрепляет сердечно-сосудистую систему, способствует нормализации уровня холестерина в крови и улучшению состояния кровеносных сосудов [8]. Исследования, проведенные южноафриканскими учеными, показали, что потребление желтых овощей и продуктов из желтозерной кукурузы способствует снижению уровня систолического артериального давления и инсулина. Оно также связано с уменьшением содержания холестерина, липопротеинов низкой плотности и триглицеридов, что свидетельствует о пользе этих продуктов для здоровья населения [9].

За период 2020–2024 гг. в России наблюдался устойчивый рост производства зерновых продуктов для завтрака и других изделий из зерновых культур, что отражает растущий спрос потребителей на здоровое питание. Согласно статистическим данным, в 2024 году отечественные производители выпустили свыше 498 тыс. тонн указанной продукции, что на 8,6 % превысило объемы производства 2023 года. Этот рост свидетельствует о восстановлении и укреплении отрасли, которая активно реагирует на изменения потребительских предпочтений и запросов рынка [10].

Применение зерна кукурузы в пищевой промышленности способствует созданию широкого спектра пищевых продуктов, отвечающих современным потребительским предпочтениям и принципам здорового питания. Экструзионные технологии позволяют перерабатывать цельное зерно, крупу или муку из кукурузы в разнообразную продукцию — цельнозерновые хлебцы, хрустящие подушечки и батончики, панирочные смеси, а также текстураты и концентраты [11].

Цвет экструдированного пищевого продукта представляет критически значимый показатель, определяющий потребительское восприятие качества. Формирование цветовых характеристик обусловлено комплексом факторов, включающих химический состав исходного сырья, технологические параметры экструзионной обработки и температурный режим процесса. При воздействии повышенных температур и пониженной относительной влажности

в условиях экструзии инициируются каскадные химические трансформации органических соединений. В частности, протекают реакции карамелизации углеводов, неферментативные реакции между белками и полисахаридами, а также окислительная деградация природных пигментов [12,13].

Высокотемпературная экструзия представляет технологический процесс переработки растительного сырья, осуществляемый при влажности массы 14–20 % и давлении 12–20 МПа, который приводит к расширению получаемого продукта за счет резкого снижения давления и температуры с мгновенным превращением воды в водяной пар. Указанная технология характеризуется высокой экономичностью и универсальностью, позволяет обрабатывать как традиционное крахмалосодержащее сырье (картофель, кукурузу), так и высокобелковое сырье (мясо, рыбу) для получения разнообразных пищевых продуктов с высокопористой структурой [14]. Для осуществления вышеуказанного процесса используют одношнековые или двухшнековые экструдеры [12]. Ключевую роль в процессе экструзии играют явления тепло- и массопереноса, при этом влажность материала существенно влияет на эффективный коэффициент теплопроводности и требует оптимизации режима обработки с учетом всех технологических факторов [13].

Цель работы — исследование технологических свойств крупы из зерна гибридов кукурузы отечественной селекции, влияющих на формирование качества экструзионных изделий.

## 2. Объекты и методы

Для исследований отобрано зерно гибридов кукурузы отечественной селекции урожая 2022 года (Белозерный 250, Белозерный 300, К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510), включенных в Госреестр для возделывания на территории РФ. Гибриды получены путем скрещивания родительских линейных и гибридных компонентов на селекционных участках ФГБНУ ВНИИ кукурузы и ООО СП ССК «Кукуруза».

Исследовали цветовые характеристики зерна гибридов кукурузы, для объективной оценки использовали колориметр CR-410 (Konica Minolta, Япония) в системе CIELAB, наиболее приближенной к человеческому зрению, с анализом значений по координатам.  $L^*$  (Lightness) описывает светлоту по шкале от 0 до 100 %, где 0 — абсолютно черный цвет; 100 — абсолютно белый цвет;  $a^*$  может варьироваться от отрицательного значения (–128°), соответствующего зеленому цвету, до положительного (+128°), соответствующего красному цвету;  $b^*$ : отрицательное значение (–128°) соответствует синему цвету, а положительное (+128°) — желтому цвету [15]. Различия между двумя цветами (оригинальный белый цвет калибровочной пластины; опытный образец) обозначаются метрикой  $\Delta E^*$ , при этом если  $\Delta E^* < 1$  — различия почти незаметны; если  $\Delta E^* = 2–4$  — различия заметны при близком рассмотрении; если  $\Delta E^* > 5$  — различия существенно заметны.

Расчёт ( $\Delta E^*$ ) производили по формуле:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L')^2 + (a^* - a')^2 + (b^* - b')^2}, \quad (1)$$

где:  $\Delta E$  — цветовые различия от оригинального белого цвета, °C;  $L^*$ , °;  $a^*$ , °C;  $b^*$ , °C — цветовые координаты оригинального белого цвета;  $L'$ , °;  $a'$ , °C;  $b'$ , °C — цветовые координаты, полученные при измерении исследуемой пробы.

Для фракционирования крупы с размером частиц от 250 мкм до 1000 мкм зерно кукурузы измельчали в молотковой дробилке для зерна ДМ-5 (ООО ПК «Проммаш», Россия). Далее для разделения полученного измельченного продукта на целевые фракции проводили ситовой анализ в соответствии с ГОСТ 26312.4-84<sup>1</sup>. Разделение на фракции крупы осуществляли на рассеве лабораторном У1-ЕРП-10-2 (ООО «Зернотехника», Россия) с использованием комплекта контрольных сетчатых сит диаметром 200 мм. Сита были установлены в последовательности с уменьшением размера ячеек: сверху — сито № 1,0 (1000 мкм), затем № 0,8 (800 мкм), № 0,67 (670 мкм), № 0,25 (250 мкм) и поддон для сбора частиц менее 250 мкм. Навеску измельченного материала помещали на верхнее сито и просеивали механическим способом в течение 5 минут до полного разделения частиц. В результате были сформированы четыре фракции крупки: крупная (>800 мкм, сход с сита 800 мкм), средняя (670–800 мкм), мелкая (250–670 мкм) и фракция муки (< 250 мкм).

Насыпную плотность круп разного гранулометрического состава определяли на металлическом волюметре Скотта РТ-SV100 (Pharma Test, Германия). В приемную воронку прибора засыпали крупу,

<sup>1</sup> ГОСТ 26312.4-84 «Крупа. Методы определения крупности или номера, примесей и доброкачественного ядра». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с

которая перемещалась через несколько перегородок, и после наполнения мерного металлического цилиндра его взвешивали. Насыпную плотность рассчитывали по формуле [16]:

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad (2)$$

где:  $\rho$  — насыпная плотность до уплотнения, г/см<sup>3</sup>;  $m$  — масса крупы, г;  $v$  — объем крупы в цилиндре до уплотнения, см<sup>3</sup>.

Влажность кукурузной крупы определяли согласно ГОСТ 26312.7-88<sup>2</sup> с использованием шкафа сушильного электрического СЭШ-3М.

Для определения вязкости и температуры клейстеризации крахмальной суспензии в условиях контролируемой температуры и сдвига использовали ротационный вискозиметр RVA Techmaster (Newport Scientific, Австралия). Навеску образца массой 3,5 г помещали в мерный стаканчик и приливали 25 мл дистиллированной воды. Выбор параметров анализа осуществляли эмпирическим путем с учетом литературных данных [17]. Профиль анализа включал следующие этапы: исходное состояние суспензии при температуре 50 °C; перемешивание суспензии специальной лопаткой устройства в течение 1 мин при 50 °C; далее при непрерывном перемешивании — линейное повышение температуры до 95 °C за 3 мин 30 с; выдерживание крахмальной суспензии при 95 °C с перемешиванием в течение 2 мин 30 с; последующее охлаждение до 50 °C за 4 мин; завершающий этап — исследование вязкости суспензии при температуре 50 °C в течение 4 мин.

Примененный температурно-временной профиль соответствует общепринятым подходам к оценке реологических свойств крахмалосодержащего сырья [17]. Детальный анализ кривых вязкости позволяет оценить следующие параметры: пиковую, конечную вязкость, степень разжижения и ретроградации, что важно для прогнозирования поведения материала при экструзионной обработке и оценке качества готовых экструдатов [18].

Выработку экструзионных изделий (экструдатов) осуществляли во Всероссийском научно-исследовательском институте пищевой биотехнологии — филиале ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» методом горячей экструзии в универсальном двухшнековом экструдере Continua 37 (Werner & Phleiderer, Германия) с дозатором. Процесс проводили при следующих параметрах: диаметр шнека — 37 мм, соотношение диаметра к длине шнека — 1:27, фильера с двумя отверстиями прямоугольного сечения 12×1,5 мм, производительность — 17 кг/ч, скорость вращения шнеков — 240 мин<sup>-1</sup>, влажность смеси — 14,5%, температура — 170–185 °C. Коэффициент расширения (EI) экструдатов рассчитывали по соотношению площадей сечения экструдата и отверстия фильеры по формуле [19,20]:

$$EI = \frac{S_c \text{ экструдата}}{S_c \text{ фильеры}}, \quad (3)$$

где: EI — коэффициент расширения;  $S_c$  экструдата — площадь сечения экструдата, мм<sup>2</sup>;  $S_c$  фильеры — площадь сечения отверстия фильеры, мм<sup>2</sup>.

Расчет затрат удельной механической энергии (SME) при экструзионной обработке осуществляли с учетом технических характеристик экструдера по формуле [21]:

$$SME = \frac{nPM}{100n_m Q}, \quad (4)$$

где: SME — удельная механическая энергия, кВт·ч/кг;  $n$  — частота вращения шнека, мин<sup>-1</sup>;  $n_m$  — максимальное число оборотов шнека, мин<sup>-1</sup>;  $M$  — крутящий момент, %;  $P$  — электрическая мощность двигателя, кВт;  $Q$  — производительность, кг/ч.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) отдельно для каждого гибрида кукурузы и каждого исследуемого показателя, сравнивая четыре фракции крупы по размеру частиц. При выявлении общего статистически значимого эффекта выполняли апостериорное множественное сравнение средних по критерию Тьюки (Tukey HSD). Результаты представлены в виде среднего значения ± стандартного отклонения ( $M \pm SD$ ),  $n = 3$ . Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

### 3. Результаты и обсуждение

В работе использовали образцы зерна гибридов белозерной (Белозерный 250, Белозерный 300) и желтозерной кукурузы (К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510) отечественной селекции. Початки гибридов кукурузы представлены на Рисунке 1.

В рамках исследования были проанализированы шесть гибридов кукурузы, различающихся по вегетационному периоду, категории гибридов и типу зерна. Трехлинейный, среднеранний гибрид кукурузы Белозерный 250 характеризуется высоким растением и зубовидным белым зерном пищевого назначения. Простой, среднеспелый гибрид кукурузы Белозерный 300 имеет растение средней высоты и белое зубовидное зерно пищевого назначения. Простой, среднеспелый гибрид кукурузы К 350 отличается высоким растением и зубовидным желтым зерном. Простой, среднепоздний гибрид кукурузы Янтарный относится к лопающейся кукурузе, растение средней высоты, зерно кремнистое, оранжевого цвета, пищевого назначения. Простой, позднеспелый гибрид кукурузы К 500 формирует высокое растение с зубовидным желтовато-белым зерном. Простой, позднеспелый гибрид кукурузы Машук 510 обладает высоким растением и желто — оранжевым зерном промежуточного типа ближе к кремнистому. Таким образом, изученные гибриды охватывают широкий спектр спелости (от среднераннего до позднеспелого), типов зерна и морфологических признаков, что позволяет дифференцированно подходить к их использованию в зависимости от почвенно-климатических условий и целевого назначения.

Объективные цветовые характеристики крупы из зерна гибридов кукурузы определяли с использованием универсального колориметра CR-410 (Konica Minolta, Япония). Данные представлены на Рисунке 2.

Наибольшее значение показателя светлоты ( $L^*$ ) отмечено в гибридах белозерной кукурузы Белозерный 250 и Белозерный 300 —  $71,01 \pm 0,13\%$  и  $71,31 \pm 0,36\%$  соответственно. Используя показатель цветовых различий от оригинального белого цвета ( $\Delta E^*$ ), можно констатировать, что зерно гибридов белозерной кукурузы Белозерный 250 и Белозерный 300 находится ближе в системе цветовых координат к оригинальному белому цвету  $12,94 \pm 0,10^\circ\text{C}$  и  $12,69 \pm 0,38^\circ\text{C}$  соответственно. Зерно указанных гибридов кукурузы не содержит оранжево-желтых пигментов — каротиноидов, что и обеспечивает белый цвет зерна.

Зерно гибрида кукурузы Янтарный по цветовым координатам имело минимальные значения показателя  $b^*$  среди всех исследуемых гибридов ( $20,26 \pm 0,19^\circ\text{C}$ ) и показателя  $\Delta E^*$  среди четырех желтозерных гибридов ( $19,36 \pm 0,13^\circ\text{C}$ ).

Показатель цветовых различий ( $\Delta E^*$ ), рассчитанный относительно оригинального белого цвета, позволил объективно оценить визуальное различие между группами гибридов. Наименьшие значения  $\Delta E^*$  у белозерных гибридов Белозерный 250 и Белозерный 300 и у гибрида Янтарный с минимальной желтизной ( $b^*$ ) подтверждают, что данный показатель, как и сама координата  $b^*$ , может служить интегральной характеристикой, связанной с накоплением каротиноидов. Это согласуется с выводами бразильских ученых о высокой корреляции между параметрами, используемыми в системе CIELAB, и содержанием пигментов в пищевых продуктах [22].

Наименьшие одинаковые значения показателя цвета  $L^*$  были получены для зерна гибридов кукурузы К 500 и Машук 510 ( $65,87 \pm 0,78\%$ ). Среди гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 следует отметить гибрид К 500 по наименьшему значению показателя  $b^*$  —  $23,58 \pm 0,48^\circ\text{C}$ .

Полученные значения светлоты ( $L^*$ ) и желтизны ( $b^*$ ) для изученных гибридов можно сопоставить с результатами российских коллег, полученными при исследовании местных образцов кукурузы из Азербайджана. В указанной работе диапазон варьирования по показателям ( $L^*$ ) составил  $42,36$ – $66,49\%$  и ( $b^*$ ) —  $18,07$ – $44,40^\circ\text{C}$ . Полученные экспериментальные данные светлоты  $L^*$  для исследуемых желтозерных гибридов, показавшие наименьшее значение  $65,87 \pm 0,78\%$  для гибридов К 500 и Машук 510, находятся в верхней части указываемого диапазона варьирования, что может указывать на более светлую окраску исследуемых гибридов кукурузы. Экспериментальные данные желтизны  $b^*$  (от  $20,26 \pm 0,19^\circ\text{C}$  у гибрида Янтарный до  $23,55 \pm 0,36^\circ\text{C}$  у гибрида К 350) полностью попадают в интервал, характерный для изученной азербайджанской коллекции [23].

Проведенные исследования позволили установить различия в составных компонентах цвета зерна исследуемых гибридов кукурузы, что может оказывать существенное влияние на цвет продуктов, полученных из конкретной партии зерна.

Для экструзионной обработки зерновых продуктов, в частности крупы, важным технологическим фактором является плотность упаковки крахмальных гранул в белковой матрице [24]. Данный показатель можно косвенно охарактеризовать, определяя насыпную плотность круп из зерна исследуемых гибридов кукурузы различного гранулометрического состава —  $< 250$  мкм,  $250$ – $670$  мкм,  $670$ – $800$  мкм и  $800$ – $1000$  мкм. Данные представлены на Рисунке 3.

<sup>2</sup> ГОСТ 26312.7-88 «Крупа. Метод определения влажности». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с



Белозерный 250

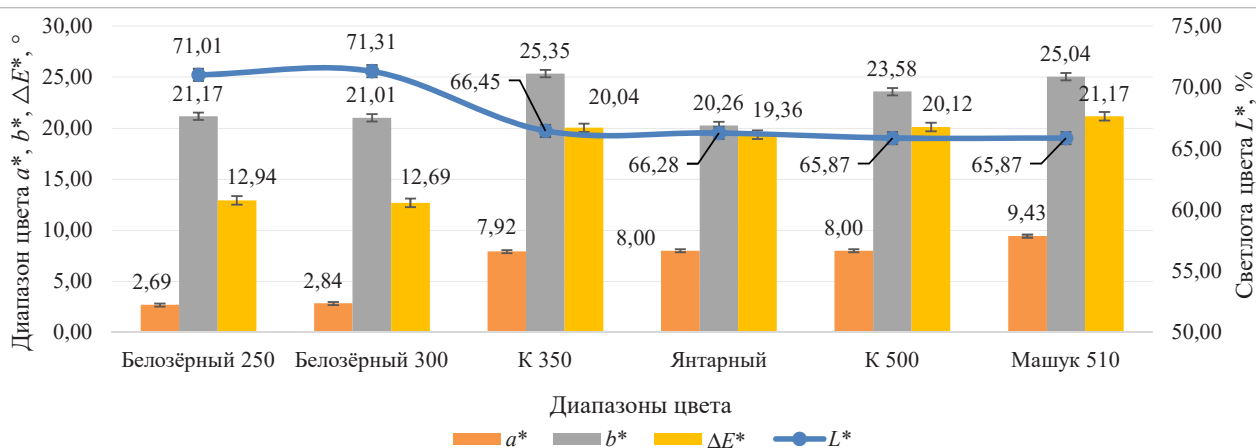
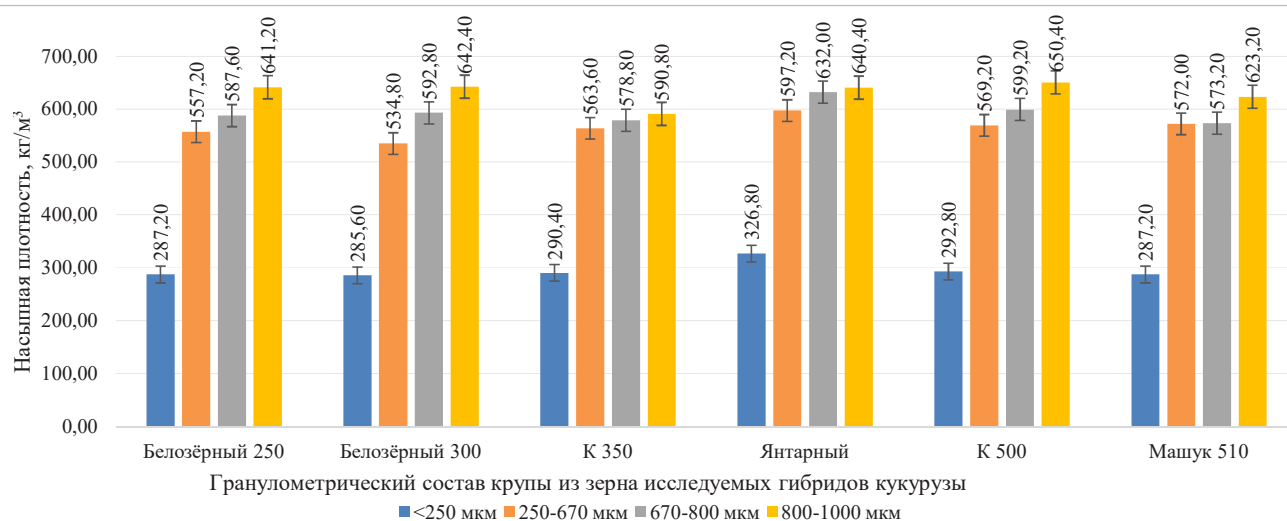
Белозерный 300

К 350

Янтарный

К 500

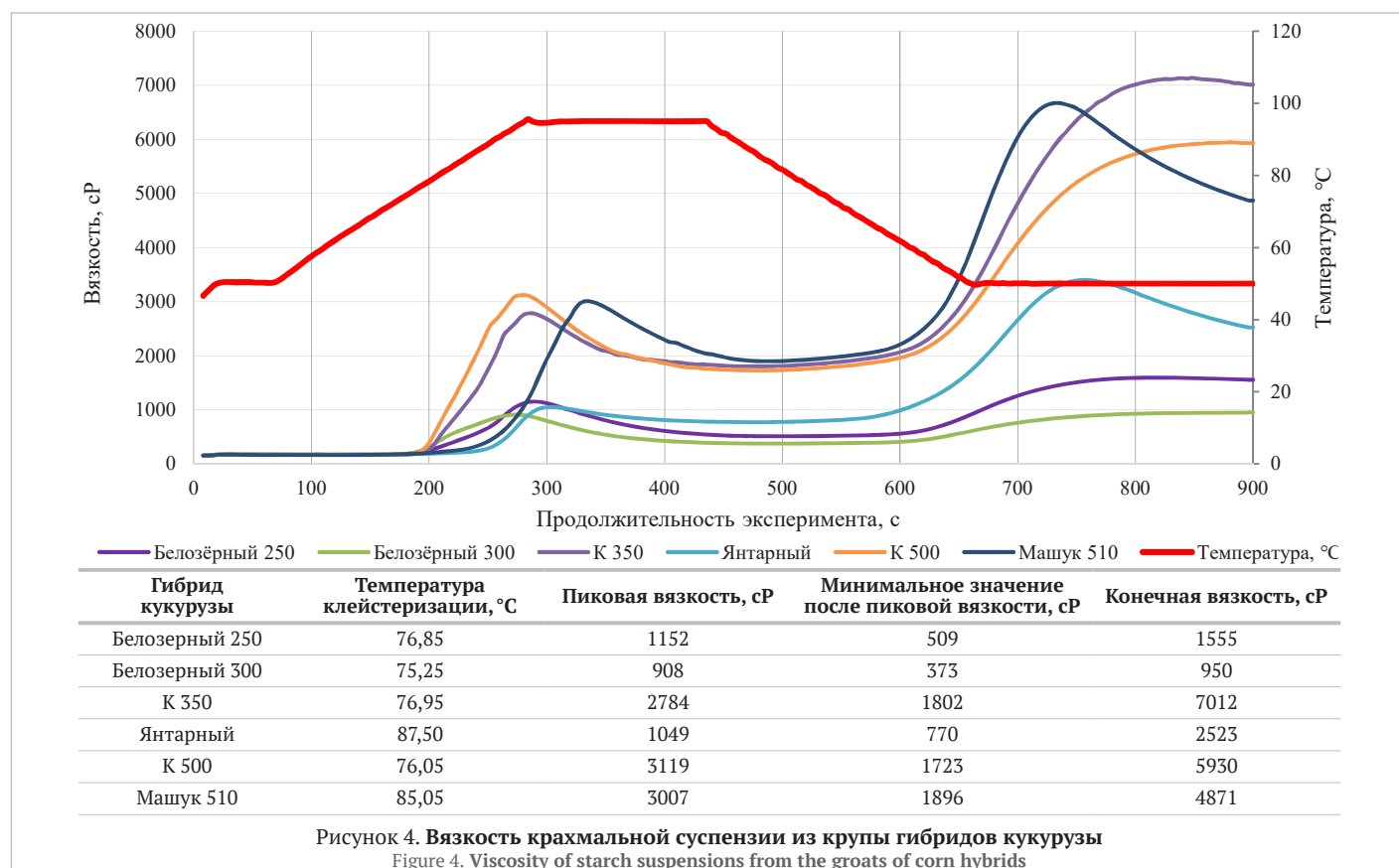
Машук 510

Рисунок 1. Початки гибридов кукурузы, используемой в исследованиях  
Figure 1. Ears of corn hybrids used in the studyРисунок 2. Цветовые характеристики зерна гибридов кукурузы отечественной селекции  
Figure 2. Color characteristics of kernels of corn hybrids of domestic breedingРисунок 3. Насыпная плотность крупы из зерна исследуемых гибридов кукурузы разного гранулометрического состава  
Figure 3. Bulk density of groats from kernels of the corn hybrids under study with different particle size distribution

Наиболее низкая насыпная плотность установлена в пробах крупы с размером частиц < 250 мкм у всех исследуемых гибридов кукурузы. Крупа из зерна гибрида лопающейся кукурузы Янтарный отличается большей насыпной плотностью по сравнению с другими гибридами кукурузы. Возможно, это связано с тем, что зерно лопающейся кукурузы имеет больший удельный вес стекловидного эндосперма. Зерновка отличается повышенным содержанием белка, что позволяет использовать этот подвид кукурузы в производстве попкорна. Белок формирует защитную матрицу, которая окружает крахмальные гранулы. Эта матрица физически препятствует полному и быстрому проникновению воды в гранулы в условиях экструзии, замедляя или предотвращая полную клейстеризацию крахмала. Ограничивая набухание крахмала, белок снижает степень структур-

ной конверсии крахмала, необходимой для формирования легкого, равномерно вспученного расплава [25]. Кукурузная крупа из гибридов Белозерный 250 и Белозерный 300 с гранулометрическим составом 1000 мкм имела незначительные различия насыпной плотности — 641,2 и 642,4 кг/м³ соответственно.

При сравнении крупы различного гранулометрического состава из гибридов кукурузы К 350 и К 500 можно выделить крупу всех размеров частиц из гибрида кукурузы К 500, т.к. все фракции имели большую насыпную плотность. Это позволило сделать вывод, что крупа с максимальной насыпной плотностью, обусловленной монокристаллическим строением эндосперма, может быть более предпочтительна для экструзионной обработки и получения пористых пищевых продуктов.



При экструзионной обработке крахмалосодержащего сырья происходит процесс клейстеризации, молекулярной деструкции, комплексообразования, интенсивность протекания которых обусловлена свойствами крахмала зерна.

Нагрев и охлаждение крахмальной суспензии вызывают изменения ее вязкости, характеризуемой кривой, полученной на ротационном вискозиметре RVA (Rapid Visco Analyser) Techmaster (Newport Scientific, Австралия). Профиль RVA можно программировать, обеспечивая гибкую настройку для исследования конкретного продукта. Показатель вязкости отражает важные изменения структуры крахмала и обуславливает технологические и органолептические свойства готовой продукции [26].

Профили изменения вязкости крахмальных суспензий из зерна гибридов кукурузы представлены на Рисунке 4.

Полученные кривые, представленные на Рисунке 4, можно разделить на три области: низких температур от 50 °C до 90 °C (левая часть), высоких температур — 90 °C (средняя часть) и снижения температуры от 90 °C до 50 °C (правая часть). Область низких температур соответствует вязкости суспензии в холодном состоянии. По мере нагревания вязкость начинает возрастать, что обусловлено началом процесса клейстеризации крахмала. Как показано в работе австралийских ученых, этот этап связан с набуханием гранул и нарушением их кристаллической структуры, причем скорость и степень набухания определяются размером молекул и плотностью разветвления амилопектина. Авторы отмечают, что степень ретроградации зависит от содержания амилозы и длины ветвей, которые определяют способность молекул к ассоциации [27]. В средней области (температура около 90 °C) достигается максимальная вязкость, что соответствует завершению клейстеризации и максимальному набуханию крахмальных гранул. Дальнейшее повышение температуры и сдвиговое воздействие приводят к деструкции гранул и снижению вязкости. Согласно результатам мексиканских коллег, добавление лимонной кислоты и оптимизация параметров экструзии могут изменять характер кривой, смещая пик вязкости и влияя на стабильность клейстера [28]. Правая область (снижение температуры от 90 °C до 50 °C) отражает процесс ретроградации: при охлаждении происходит частичное восстановление молекулярных взаимодействий, что выражается в повторном повышении вязкости. Таким образом, характер кривых на Рисунке 4 наглядно демонстрирует, что изменение вязкости крахмальной суспензии при нагревании и охлаждении определяется температурой клейстеризации, структурными особенностями крахмала и условиями термомеханического воздей-

ствия [27,28]. Крахмальные суспензии, полученные из зерна гибридов кукурузы Янтарный и Машук 510, достигали пиковой вязкости в области высоких температур — 87,50 °C и 85,05 °C соответственно. Крахмал исследуемых проб из зерна гибридов кукурузы Белозёрный 250, Белозёрный 300, К 350 и К 500 начинал клейстеризовываться при более низкой температуре — 76,85 °C, 75,25 °C, 76,95 °C и 76,05 °C соответственно. Вероятно, это обусловлено различиями в молекулярном строении полисахаридов и соотношением линейных и разветвленных структур.

Предположения о взаимодействии амилозы и амилопектина в клейстеризованном состоянии при низком содержании воды подтверждаются работами Antonov с коллегами [29], Brochard [30] и Grosberg and Khokhlov [31]. Согласно модели Antonov и соавторов несовместимость нейтральных полисахаридов в системе, состоящей из двух полисахаридов и воды, обусловлена различиями в структуре их макромолекулярных цепей [29].

В процессе экструзии крахмал трансформируется в плотный гель. Известно, что амилоза, один из компонентов крахмала, может образовывать спиральные структуры V-типа с небольшими включениями молекул, таких как липиды. Эти амилозо-липидные комплексы важны, так как они влияют на свойства и качество крахмалосодержащих продуктов [32,33].

Температура и влажность являются ключевыми факторами, определяющими степень и полноту клейстеризации крахмала при экструдировании. В работе бразильских ученых методом дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) установлено, что с увеличением влажности температура перехода (максимум эндотермы) закономерно снижается. Так, при влажности 10 % температура максимальной эндотермы составила 126 °C, при 20 % — 123 °C, а при 30 % — 109 °C. При повышении влажности до 40–60 % температура перехода стабилизируется на уровне 107–108 °C. Авторы отмечают, что при низкой влажности (менее 10 %) процесс разрушения гранул протекает при значительно более высоких температурах (168 °C при 0 % влажности). Таким образом, для полной клейстеризации крахмала в экструдере могут применяться различные сочетания параметров: например, температура около 120 °C при влажности 20–30 % или более высокая температура при снижении влажности до 10–20 %. Выбор режима зависит от требуемой степени деструкции материала и энергетических затрат процесса [34]. Высокая температура ускоряет разрушение структуры крахмальных гранул и переход полисахаридов в растворимую форму, а наличие достаточного количества влаги обеспечивает набухание и термомеханическую деструкцию

крахмала. При недостаточной влажности клейстеризация протекает неполно, так как вода необходима для проникновения в гранулы и разрыва внутренних связей [35]. Слишком низкая или слишком высокая влажность может снижать эффективность процесса: при избытке воды снижаются температура и давление, а при недостатке ограничивается набухание и растворение крахмала [36,37]. Таким образом, оптимальное сочетание температуры и влажности обеспечивает максимальную степень клейстеризации крахмала при экструдировании. На основании полученных данных можно предположить, что образцы суспензий из крупы, содержащие большее количество амилопектина, могут иметь более высокую вязкость раствора вследствие увеличения объема разветвленных молекул при гидратации [38].

Проведены исследования по изменению вязкости крахмальной суспензии крупы, полученной из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510. В результате анализа было установлено, что указанные гибриды достигли пиковой вязкости — 2784 сР, 3119 сР и 3007 сР соответственно (Рисунок 4). В крахмальной суспензии из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 процесс дезагрегации макромолекул до пиковой вязкости протекал быстрее, чем в крахмальной суспензии крупы из зерна гибридов кукурузы Белозерный 250, Белозерный 300 и Янтарный, вследствие возможной повышенной плотности или неоднородности частиц.

Минимальное значение вязкости суспензии после пика в средней области характеризуется величиной спада и считается истинной вязкостью в горячем состоянии. Минимальное значение вязкости крахмального клейстера, приготовленного из крупы зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510, составило 1802 сР, 1723 сР и 1896 сР соответственно (Рисунок 4), отражая начальную стадию формирования клейстера.

Область снижения температур определяют как область выравнивания или увеличения вязкости [17]. По мере формирования структуры в подвергнутом тепловой обработке образце суспензии этот показатель отражает степень клейстеризации крахмала в пробе зерна гибридов кукурузы. Крахмальная суспензия с доминирующим дезагрегационным состоянием макромолекул характеризуется более высоким значением вязкости. Установлены конечные показатели вязкости проб крупы из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 — 7012 сР, 5930 сР и 4871 сР соответственно (Рисунок 4).

Для формирования изотропной структуры пористых продуктов важным фактором является увеличение вязкости крахмальной суспензии в правой области RVA-профиля. Таким свойством обладает крахмал из зерна гибрида кукурузы К 500, в отличие от образцов крахмала из зерна гибридов кукурузы К 350 и Машук 510, в которых вязкость суспензии снижалась к окончанию эксперимента. На основании результатов исследований [36,37,39], представленных в работах, сделаны выводы, демонстрирующие несовместимость амилозы и амилопектина — полисахаридов с линейной и разветвленной структурой — в системах с высоким содержанием влаги. В этих условиях возможна полная реализация присущих макромолекулам конформаций, что делает полученные выводы логичными. Однако следует учитывать, что уменьшение содержания влаги в системах приводит к снижению вероятности реализации полного набора конформаций макромолекул биополимеров [40,41].

Можно предположить, что образцы проб из зерна кукурузы К 350, К 500 и Машук 510 содержат большее количество амилопектина и его разветвленные молекулы при гидратации увеличиваются в объеме [42,43], что приводит к увеличению вязкости раствора (Рисунок 4).

Применяли экструзионную обработку кукурузной крупы для оценки коэффициента расширения экструдата.

Образцы кукурузной крупы экструдировали на двухшнековом экструдере Continua 37 (Werner & Phleiderer, Германия). Перед началом работы каждую смесь калибровали на дозаторе экструдера для обеспечения эквивалентной производительности для каждого образца.

В Таблице 1 показаны параметры экструзионной обработки круп разного гранулометрического состава 6 гибридов кукурузы отечественной селекции. Об эффективности экструзионной обработки судили по показателю коэффициента расширения.

Температура в экструдере формируется двумя способами. Во-первых, это внешний нагрев — в работе британских ученых использовался электрический нагрев корпуса экструдера в двух зонах. Во-вторых, это внутренний нагрев за счет вязкостной диссипации: при вращении шнеков материал сдвигается, возникает трение и выделяется тепло. В результате фактическая температура материала может отличаться от заданной. В исследовании при одинаковых настройках нагрева температура материала и давление менялись в зависимости от состава смеси, что объясняется разной интенсивностью диссипации.

Таблица 1. Режимы экструзионной обработки крупы из зерна гибридов кукурузы

Table 1. Regimes of extrusion processing of groats from kernels of corn hybrids

| Гибрид кукурузы | Размер частиц, мкм | Влажность крупы, %      | Температура, °С    | Крутящий момент, %  | Давление, МПа        | Коэффициент расширения | Удельная механическая энергия, кВт·ч/кг |
|-----------------|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------------|
| Белозерный 250  | < 250              | 11,8±0,2 <sup>c</sup>   | 185±2 <sup>c</sup> | 56±2 <sup>c</sup>   | 4,5±0,2 <sup>a</sup> | 7,9±0,1 <sup>b</sup>   | 0,250±0,009 <sup>d</sup>                |
|                 | 250–670            | 11,1±0,1 <sup>b</sup>   | 172±1 <sup>b</sup> | 56±1 <sup>c</sup>   | 6,0±0,3 <sup>c</sup> | 5,8±0,2 <sup>a</sup>   | 0,188±0,003 <sup>c</sup>                |
|                 | 670–800            | 10,4±0,4 <sup>a</sup>   | 165±1 <sup>a</sup> | 40±1 <sup>a</sup>   | 6,0±0,2 <sup>c</sup> | 7,6±0,2 <sup>b</sup>   | 0,134±0,003 <sup>a</sup>                |
|                 | 800–1000           | 10,3±0,1 <sup>a</sup>   | 167±1 <sup>a</sup> | 47±1 <sup>b</sup>   | 5,4±0,1 <sup>b</sup> | 10,7±0,1 <sup>c</sup>  | 0,158±0,003 <sup>b</sup>                |
| Белозерный 300  | < 250              | 11,1±0,1 <sup>c</sup>   | 182±2 <sup>b</sup> | 90±2 <sup>c</sup>   | 6,0±0,2 <sup>b</sup> | 7,2±0,1 <sup>a</sup>   | 0,302±0,007 <sup>c</sup>                |
|                 | 250–670            | 10,8±0,1 <sup>b,c</sup> | 174±2 <sup>a</sup> | 51±1 <sup>a</sup>   | 6,1±0,1 <sup>b</sup> | 8,0±0,1 <sup>b</sup>   | 0,171±0,003 <sup>a</sup>                |
|                 | 670–800            | 10,4±0,1 <sup>b</sup>   | 172±1 <sup>a</sup> | 57±2 <sup>b</sup>   | 5,1±0,1 <sup>a</sup> | 7,4±0,1 <sup>a</sup>   | 0,191±0,007 <sup>b</sup>                |
|                 | 800–1000           | 9,5±0,3 <sup>a</sup>    | 170±1 <sup>a</sup> | 52±2 <sup>a</sup>   | 4,8±0,2 <sup>a</sup> | 9,9±0,1 <sup>c</sup>   | 0,174±0,007 <sup>a</sup>                |
| К 350           | < 250              | 11,1±0,2 <sup>c</sup>   | 170±2 <sup>b</sup> | 80±3 <sup>d</sup>   | 7,5±0,3 <sup>c</sup> | 9,0±0,1 <sup>a</sup>   | 0,268±0,01 <sup>d</sup>                 |
|                 | 250–670            | 10,5±0,2 <sup>b</sup>   | 168±1 <sup>b</sup> | 60±2 <sup>c</sup>   | 5,3±0,2 <sup>b</sup> | 9,6±0,1 <sup>b</sup>   | 0,201±0,007 <sup>c</sup>                |
|                 | 670–800            | 9,8±0,1 <sup>a</sup>    | 162±1 <sup>a</sup> | 46±1 <sup>a</sup>   | 5,2±0,2 <sup>b</sup> | 8,8±0,2 <sup>a</sup>   | 0,154±0,003 <sup>a</sup>                |
|                 | 800–1000           | 10,0±0,1 <sup>a</sup>   | 175±2 <sup>c</sup> | 54±1 <sup>b</sup>   | 4,3±0,1 <sup>a</sup> | 11,9±0,1 <sup>c</sup>  | 0,181±0,003 <sup>b</sup>                |
| Янтарный        | < 250              | 10,9±0,1 <sup>c</sup>   | 160±2 <sup>a</sup> | 46±1 <sup>a</sup>   | 6,0±0,2 <sup>b</sup> | 1,8±0,1 <sup>a</sup>   | 0,154±0,003 <sup>a</sup>                |
|                 | 250–670            | 10,7±0,2 <sup>c</sup>   | 174±2 <sup>b</sup> | 56±2 <sup>b</sup>   | 5,0±0,2 <sup>a</sup> | 8,2±0,1 <sup>c</sup>   | 0,188±0,007 <sup>b</sup>                |
|                 | 670–800            | 10,1±0,1 <sup>b</sup>   | 172±1 <sup>b</sup> | 46±1 <sup>a</sup>   | 5,0±0,1 <sup>a</sup> | 5,6±0,1 <sup>b</sup>   | 0,154±0,003 <sup>a</sup>                |
|                 | 800–1000           | 9,4±0,1 <sup>a</sup>    | 170±1 <sup>b</sup> | 46±1 <sup>a</sup>   | 4,7±0,2 <sup>a</sup> | 9,2±0,1 <sup>d</sup>   | 0,154±0,003 <sup>a</sup>                |
| К 500           | < 250              | 10,5±0,1 <sup>b</sup>   | 180±2 <sup>b</sup> | 80±2 <sup>c</sup>   | 6,7±0,3 <sup>c</sup> | 11,6±0,2 <sup>b</sup>  | 0,268±0,007 <sup>c</sup>                |
|                 | 250–670            | 10,3±0,2 <sup>b</sup>   | 172±1 <sup>a</sup> | 52±1 <sup>a</sup>   | 4,9±0,2 <sup>b</sup> | 12,0±0,2 <sup>b</sup>  | 0,174±0,003 <sup>a</sup>                |
|                 | 670–800            | 9,5±0,2 <sup>a</sup>    | 175±2 <sup>a</sup> | 57±2 <sup>b</sup>   | 4,9±0,2 <sup>b</sup> | 11,7±0,1 <sup>b</sup>  | 0,191±0,007 <sup>b</sup>                |
|                 | 800–1000           | 9,4±0,1 <sup>a</sup>    | 172±1 <sup>a</sup> | 49±1 <sup>a</sup>   | 4,3±0,1 <sup>a</sup> | 9,6±0,1 <sup>a</sup>   | 0,164±0,003 <sup>a</sup>                |
| Машук 510       | < 250              | 12,1±0,5 <sup>b</sup>   | 185±2 <sup>b</sup> | 60±2 <sup>a,b</sup> | 4,5±0,2 <sup>a</sup> | 11,0±0,1 <sup>d</sup>  | 0,201±0,007 <sup>a</sup>                |
|                 | 250–670            | 12,6±0,2 <sup>b</sup>   | 175±2 <sup>a</sup> | 76±2 <sup>c</sup>   | 5,5±0,2 <sup>b</sup> | 7,6±0,1 <sup>b</sup>   | 0,255±0,007 <sup>b</sup>                |
|                 | 670–800            | 10,9±0,1 <sup>a</sup>   | 175±2 <sup>a</sup> | 64±2 <sup>b</sup>   | 4,7±0,2 <sup>a</sup> | 7,3±0,1 <sup>a</sup>   | 0,215±0,007 <sup>a</sup>                |
|                 | 800–1000           | 10,5±0,1 <sup>a</sup>   | 173±1 <sup>a</sup> | 59±1 <sup>a</sup>   | 4,5±0,1 <sup>a</sup> | 8,0±0,1 <sup>c</sup>   | 0,210±0,004 <sup>a</sup>                |

Данные представлены как  $M \pm SD$  ( $n = 3$ ). Разные надстрочные буквы указывают на статистически значимые различия между фракциями крупы в пределах одного гибрида кукурузы и одного показателя по результатам теста Тьюки ( $p < 0,05$ ). Одинаковые буквы указывают на отсутствие статистически значимых различий.

Этот эффект хорошо прослеживается в Таблице 1 с режимами экструзионной обработки крупы из зерна гибридов кукурузы. Например, при близких заданных температурах (160–185 °C) значения крутящего момента, давления и удельной механической энергии (SME) заметно различаются в зависимости от гибрида и размера частиц. Так, у гибрида К 500 для фракции < 250 мкм SME достигает  $0,268 \pm 0,007$  кВт·ч/кг, а крутящий момент —  $80 \pm 2\%$ , тогда как у крупной фракции (800–1000 мкм) SME снижается до  $0,164 \pm 0,003$  кВт·ч/кг. Это говорит о том, что рассеивание тепла напрямую связано с физическими свойствами сырья, и фактический температурный режим всегда является результатом совместного действия внешнего нагрева и внутреннего тепловыделения [21].

Данные, представленные в Таблице 1, свидетельствуют, что большие значения показателя коэффициента расширения имели экструдаты из крупы с гранулометрическим составом 800–1000 мкм зерна всех гибридов кукурузы, по сравнению с экструдатами из крупы фракций с меньшими размерами частиц.

Коэффициент расширения экструдатов зависит от свойств сырья и способности материала сохранять пористую структуру после выхода из фильеры. В работе группы египетских и индийских ученых показано, что влажность исходной смеси играет ключевую роль: при низкой влажности (14%) деструкция крахмала максимальна, что способствует высокому расширению, а с увеличением влажности (до 22%) коэффициент расширения снижается. Это согласуется с данными, полученными при экструзии различных гибридов кукурузы (Таблица 1). У образцов с низкой влажностью (9,4–10,5%) коэффициент расширения достигает 11–12, тогда как при более высокой влажности (11–12%) значения коэффициента расширения снижаются до 5–8. Также заметно влияние размера частиц: самые мелкие фракции (< 250 мкм) дают высокие значения коэффициента расширения при относительно высокой удельной механической энергии. Это подтверждает, что как влажность, так и структурные характеристики сырья определяют степень парообразования и стабильность пористой структуры после выхода из экструдера [17].

В результате экспериментов было установлено, что экструдаты, полученные из крупы зерна гибридов кукурузы Белозерный 250, Белозерный 300 и Янтарный, имели низкий коэффициент расширения, что негативно отражалось на текстуре экструдатов, следовательно, их использование в экструзионной обработке не целесообразно. Максимальный показатель коэффициента расширения ( $12,0 \pm 0,2$ ) установлен в экструдате из крупы с размером частиц 250–670 мкм, полученном из зерна гибрида К 500. Экструзионная обработка крупы с размером частиц 250–670 мкм происходила при меньшем крутящем моменте ( $52 \pm 1\%$ ) и давлении в шнековой камере экструдера —  $4,9 \pm 0,2$  МПа, что обеспечило меньшую затраченную удельную энергию ( $0,174 \pm 0,003$  кВт·ч/кг) по сравнению с обработкой других образцов крупы кукурузы. Установлены высокие показатели коэффициента расширения экструдатов других фракций крупы из зерна гибрида К 500, что указывает на целесообразность применения продуктов его переработки в пищевых технологиях.

#### 4. Заключение

Важнейшими технологическими свойствами крахмалосодержащего сырья являются термодинамические параметры биополимеров при температурном воздействии. Определяли температуру клейстеризации, а также пиковую, минимальную и конечную вязкости крахмальной суспензии при заданном профиле температурного воздействия.

Исследованы технологические свойства крупы различного гранулометрического состава (<250 мкм, 250–670 мкм, 670–800 мкм и 800–1000 мкм) из зерна гибридов белозерной (Белозерный 250 и Белозерный 300) и желтозерной (К 350, Янтарный, К 500 и Машук 510) кукурузы отечественной селекции: цветовые характеристики, насыпная плотность, температура клейстеризации и вязкость крахмальной суспензии. Получены экструдаты из крупы исследуемых гибридов кукурузы и определены показатели коэффициента расширения и удельной механической энергии процесса обработки.

При исследовании цветовых характеристик в цветовом пространстве  $L^*$ ,  $a^*$  и  $b^*$  установлены различия в цвете зерна разных гибридов кукурузы, что может влиять на цвет продукции, изготовленной из соответствующего зерна.

Исследования технологических свойств крупы разного гранулометрического состава позволили определить крупу всех фракций из зерна гибрида кукурузы К 500 как отличающуюся большей насыпной плотностью по сравнению с крупной из зерна других исследуемых гибридов. Структура указанной кукурузной крупы предпочтительна для экструзионной обработки вследствие более высокой максимальной насыпной плотности, что, вероятно, обусловлено целой структурой эндосперма.

Использование ротационного вискозиметра позволило объективно оценить реологические свойства крахмалосодержащего сырья. Получаемые кривые вязкости дают возможность рассчитать ключевые параметры свойств крахмала (пиковую, конечную вязкость, степень разжижения и ретроградации), которые коррелируют с изменениями сырья при экструзии и с качеством готовых экструзионных продуктов.

Основным показателем, отражающим потребительские достоинства экструдатов, определен коэффициент расширения. Максимальный коэффициент расширения установлен для экструдата из крупы с гранулометрическим составом 250–670 мкм из зерна гибрида кукурузы К 500. Экструдаты, полученные из других исследуемых фракций крупы этого гибрида, также имели высокие значения коэффициента расширения. Следует отметить, что формирование пористой макроструктуры экструдатов из крупы зерна гибрида К 500 происходило при меньших энергетических затратах на единицу готового продукта, на что указывает показатель удельной энергии —  $0,174 \pm 0,003$  кВт·ч/кг.

Проведенные исследования показали целесообразность использования для экструзионной обработки крупы из зерна гибридов кукурузы К 350, К 500 и Машук 510, имеющих монокотилеидное строение эндосперма и лучшие термодинамические характеристики крахмала.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Gongora, I. G., Taron-Dunoyer, A., Quintana-Martinez, S. E., Garcia-Zapateiro, L. A. (2025). Physicochemical and technological properties of the starch from corn (*Zea mays*) variety P-7928. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 13(1), 508–515. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.13.1.35>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2026). Crops and livestock products in the world. Retrieved from [https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL?regions=5000&elements=2312,2510&items=809, 800, 221, 711,515,526,226,366,367,572,839,203,486,44,176,552,216,181,420,89,358,101,568,426,217,591,378,125,265,393,108,531,220,191,459,689,401,693,698,661,249,656,813,195,554, QC>,397,550,577,149,399,569,771,94,720,549,560,446,406,242,225,336,677,277,780,310,263,782,592,224,407,497,201,372,333,461,210,56,571,671,299,79,103,449,292,836,702,75,254,430,260,403,402,490,414,558,512,821,619,234,339,542,211,723,541,161,603,463,600,534,521,187,417,687,748,587,197,574,223,489,536,507,296,116,394,754,523,92,788,270,547,27,71,280,328,289,789,83,530,236,373,544,423,157,156,267,122,305,495,136,667,388,97,777,275,826,692,205,222,567,15,137,135&years=2024&output\\_type=table&file\\_type=csv&submit=true](https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL?regions=5000&elements=2312,2510&items=809, 800, 221, 711,515,526,226,366,367,572,839,203,486,44,176,552,216,181,420,89,358,101,568,426,217,591,378,125,265,393,108,531,220,191,459,689,401,693,698,661,249,656,813,195,554, QC>,397,550,577,149,399,569,771,94,720,549,560,446,406,242,225,336,677,277,780,310,263,782,592,224,407,497,201,372,333,461,210,56,571,671,299,79,103,449,292,836,702,75,254,430,260,403,402,490,414,558,512,821,619,234,339,542,211,723,541,161,603,463,600,534,521,187,417,687,748,587,197,574,223,489,536,507,296,116,394,754,523,92,788,270,547,27,71,280,328,289,789,83,530,236,373,544,423,157,156,267,122,305,495,136,667,388,97,777,275,826,692,205,222,567,15,137,135&years=2024&output_type=table&file_type=csv&submit=true) Accessed March 17, 2026
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2026). Crops and livestock products in Russian Federation. Retrieved from [https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL?countries=185&elements=2312, 2510&items=809,800,221,711,515,526,226,366,367,572,839,203,486,44,176,552,216,181,420,89,358,101,568,426,217,591,378,125,265,393,108,531,220,191,459,689,401,693,698,661,249,656,813,195,554, QC>,397,550,577,149,399,569,771,94,720,549,560,446,406,242,225,336,677,277,780,310,263,782,592,224,407,497,201,372,333,461,210,56,571,671,299,79,103,449,292,836,702,75,254,430,260,403,402,490,414,558,512,821,619,234,339,542,211,723,541,161,603,463,600,534,521,187,417,687,748,587,197,574,223,489,536,507,296,116,394,754,523,92,788,270,547,27,71,280,328,289,789,83,530,236,373,544,423,157,156,267,122,305,495,136,667,388,97,777,275,826,692,205,222,567,15,137,135&years=2024&output\\_type=table&file\\_type=csv&submit=true](https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL?countries=185&elements=2312, 2510&items=809,800,221,711,515,526,226,366,367,572,839,203,486,44,176,552,216,181,420,89,358,101,568,426,217,591,378,125,265,393,108,531,220,191,459,689,401,693,698,661,249,656,813,195,554, QC>,397,550,577,149,399,569,771,94,720,549,560,446,406,242,225,336,677,277,780,310,263,782,592,224,407,497,201,372,333,461,210,56,571,671,299,79,103,449,292,836,702,75,254,430,260,403,402,490,414,558,512,821,619,234,339,542,211,723,541,161,603,463,600,534,521,187,417,687,748,587,197,574,223,489,536,507,296,116,394,754,523,92,788,270,547,27,71,280,328,289,789,83,530,236,373,544,423,157,156,267,122,305,495,136,667,388,97,777,275,826,692,205,222,567,15,137,135&years=2024&output_type=table&file_type=csv&submit=true) Accessed March 17, 2026
- Лачуга, Ю. Ф., Плугатарь, Ю. В., Трубилин А. И., Макрушин, Н. М., Малько, А. М., Лукомец, В. М. и др. (2018). Современное состояние и перспективы развития семеноводства в Российской Федерации. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, 72, 9–24. [Lachuga, Yu. F., Plugatar, Yu. V., Trubilin, A. I., Makrushin, N. M., Malko, A. M., Lukomets, V. M. et al. (2018). Current state and prospects of the development of seed breeding in the Russian Federation. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 72, 9–24 (In Russian)]
- Половцева, А. А., Наумцев, О. Н., Борисова, А. В. (2020). Использование кукурузной, рисовой и амарантовой муки в рецептуре безглютеновых кексов. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 1(373), 48–52. [Polovtseva, A. A., Naumtsev, O. N., Borisova, A. V. (2020). Use of corn, rice and amaranth flour in gluten-free cupcakes recipes. *Izvestiya VUZOV. Food Technology*, 1(373), 48–52 (In Russian)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.1.13>
- Журавель, Н. В., Чумакова, В. В., Мартиросян, В. В. (2012). Зерновой амарант — перспективная культура. *Достижения науки и техники АПК*, 10, 71–72. [Zhuravel, N. V., Chumakova, V. V., Martirosyan, V. V. (2012). Grain amaranth — culture perspective. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 10, 71–72 (In Russian)]
- Kaur, S., Kumar, K., Singh, L., Sharanagat, V. S., Nema, P. K., Mishra, V. et al. (2024). Gluten-free grains: Importance, processing and its effect on quality of gluten-free products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(7), 1988–2015. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2119933>
- Liedike, B., Khatib, M., Tabarsi, B., Harris, M., Wilson, S. L., Ortega-Santos, C. P. et al. (2024). Evaluating the effects of corn flour product consumption on cardio-

- metabolic outcomes and the gut microbiota in adults with elevated cholesterol: A randomized crossover. *Journal of Nutrition*, 154(8), 2437–2447. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2024.06.003>
9. Lopes, T., Zemlin, A. E., Hill, J., Mchiza, Z. J., Peer, N., Erasmus, R. T. et al. (2022). Consumption of plant foods and its association with cardiovascular disease risk profile in South Africans at high-risk of type 2 diabetes mellitus. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), Article 13264. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013264>
  10. Alto Consulting Group (ACG) (2025). Новости рынков: Производство продуктов зерновых для завтрака в России 2024: ключевые итоги и тенденции. Электронный ресурс <https://alto-group.ru/new/11793-proizvodstvo-produktov-zernovyh-dlja-zavtraka-v-rossii-2024-kljuchevye-itogi-i-tendencii.html> Дата доступа 13.11.2025 [Alto Consulting Group (ACG) (2025). Market news: Manufacturing breakfast cereals in Russia, 2024: Key results and trends. Retrieved from <https://alto-group.ru/new/11793-proizvodstvo-produktov-zernovyh-dlja-zavtraka-v-rossii-2024-kljuchevye-itogi-i-tendencii.html> Accessed November 13, 2025 (In Russian)]
  11. Sahu, C., Patel, S. (2021). Optimization of maize-millet based soy fortified composite flour for preparation of RTE extruded products using D-optimal mixture design. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 2651–2660. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04771-1>
  12. Бахчевников, О. Н., Брагинцев, С. В. (2020). Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор). *Техника и технология пищевых производств*, 50(4), 690–706. [Bakhchevnikov, O. N., Braginets, S. V. (2020). Extrusion of plant raw materials in food production: A review. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(4), 690–706. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-690-706>
  13. Малкина, В. Д., Мартиросян, В. В., Жиркова, Е. В. (2013). Модификация свойств растительного сырья в процессе экструзионной обработки. Пятигорск: РИА-КМВ, 2013. [Malkina, V. D., Martirosyan, V. V., Zhirkova, E. V. (2013). Modification of properties of plant raw materials during extrusion processing. Pyatigorsk: RIA-KMV, 2013 (In Russian)]
  14. Алексеев, Г. В., Савельев, А. П., Бирченко, А. А., Ивлева, Е. Н. (2024). Возможности повышения качества экструдированных кукурузных крахмалов. *Ползуновский вестник*, 3, 55–61. [Alekseev, G. V., Saveliev, A. P., Birchenko, A. A., Ivleva, E. N. (2024). Possibilities of improving quality of extruded corn starches. *Polzunovskiy Vestnik*, 3, 55–61 (In Russian)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.008>
  15. Комышев, Е. Г., Генаев, М. А., Афонников, Д. А. (2020). Анализ цветовых и текстурных характеристик зерен злаков на цифровых изображениях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*, 24(4), 340–347. [Komyshev, E. G., Genaev, M. A., Afonnikov, D. A. (2020). Analysis of color and texture characteristics of cereals on digital images. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 24(4), 340–347. (In Russian)] <https://doi.org/10.18699/VJ20.626>
  16. Бркич, Г. Э., Пятигорская, Н. В., Зырянов, О. А. (2020). Изучение технологических свойств фармацевтической субстанции на основе производного 3,7-диазабицикло [3.3.1] нонана. *Медико-фармацевтический журнал Пульс*, 22(3), 18–23. [Brkich, G. E., Pyatigorskaya, N. V., Zyryanov, O. A. (2020). Development of technological properties of the pharmaceutical substance based on the derivative of 3,7-diazabicyclo [3.3.1] nonane. *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse"*, 22(3), 18–23. (In Russian)] <https://doi.org/10.26787/ny-dha-2686-6838-2020-22-3-18-23>
  17. Ali, S., Singh, B., Sharma, S. (2019). Impact of feed moisture on microstructure, crystallinity, pasting, physico-functional properties and *in vitro* digestibility of twin-screw extruded corn and potato starches. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74, 474–480. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00762-6>
  18. Calderón, C., Quelal, M., Villacrés, E., Manosalvas-Quiroz, L. A., Álvarez, J., Villacis, N. (2023). Impact of extrusion on the physicochemical parameters of two varieties of corn (*Zea mays*). *AIMS Agriculture and Food*, 8(3), 873–888. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2023046>
  19. Sahu, C., Patel, S., Tripathi, A. K. (2022). Effect of extrusion parameters on physical and functional quality of soy protein enriched maize based extruded snack. *Applied Food Research*, 2(4), Article 100072. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100072>
  20. Фролов, Д. И. (2019). Эффективность и энергозатраты в процессе производства кукурузных экструдатов. *Инновационная техника и технология*, 2(19), 38–42. [Frolov, D. I. (2019). Efficiency and energy consumption in the process of manufacture of corn extrudes. *Innovative Machinery and Technology*, 2(19), 38–42 (In Russian)]
  21. Potter, R., Stojceska, V., Plunkett, A. (2013). The use of fruit powders in extruded snacks suitable for Children's diets. *LWT*, 51, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.015>
  22. Sant'Anna, V., Gurak, P. D., Marczak, L. D. F., Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods – A review. *Dyes and Pigments*, 98(3), 601–608. <http://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.04.011>
  23. Мамедова, Х. Р., Хатефов, Э. В., Экинжи, Р. (2025). Изменчивость параметров цвета зерна местных сортов кукурузы Азербайджана. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 186(3), 92–101. [Mammadova, H. R., Khatefov, E. B., Ekinji, R. (2025). Variability of grain color parameters among local maize cultivars in Azerbaijan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 186(3), 92–101 (In Russian)] <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2025-3-92-101>
  24. Wang, Yi., Chen, L., Yang, T., Ma, Y., McClements, D. J., Ren, F. et al. (2021). A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods. *Food Hydrocolloids*, 113(1), Article 106543. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106543>
  25. Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S., Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility – A review. *Foods*, 11(16), Article 2538. <https://doi.org/10.3390/foods11162538>
  26. Neder-Suárez, D., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., Zazueta-Morales, J. d. J., Paraguay-Delgado, F., Ruiz-Gutiérrez, M. G. (2021). Evaluation of the physicochemical properties of third-generation snacks made from blue corn, black beans, and sweet chard produced by extrusion. *LWT*, 146, Article 111414. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111414>
  27. Liu, W.-C., Halley, P. J., Gilbert, R. G. (2010). Mechanism of degradation of starch, a highly branched polymer, during extrusion. *Macromolecules*, 43(3), 2855–2864. <https://doi.org/10.1021/ma100067x>
  28. Neder-Suárez, D., Amaya-Guerra, C. A., Pérez-Carrillo, E., Quintero-Ramos, A., Mendez-Zamora, G., Sánchez-Madriral, M. Á. et al. (2020). Optimization of an extrusion cooking process to increase formation of resistant starch from corn starch with addition of citric acid. *Starch*, 72(3–4), Article 1900150. <https://doi.org/10.1002/star.201900150>
  29. Antonov, Yu. A., Pletenko, M. G., Tolstoguzov, V. B. (1987). Phase state of the systems water-polysaccharide-I-polysaccharide-II. *Polymer Science U. S. S. R.*, 29(12), 2724–2729. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(87\)90185-7](https://doi.org/10.1016/0032-3950(87)90185-7)
  30. Brochard, F., De Gennes, P. G. (1983). Phase transitions of binary mixtures in random media. *Journal de Physique Lettres*, 44(18), 785–791. <https://doi.org/10.1051/jphyslet:019830044018078500>
  31. Grosberg, A. Yu., Khokhlov, A. R. (1994). Statistical physics of macromolecules. New York: AIP Press, 1994.
  32. Genkina, N. K., Kiseleva, V. I., Martirosyan V. V. (2015). Different types of V amylose-lipid inclusion complexes in maize extrudates revealed by DSC analysis. *Starch*, 67(9–10), 752–755. <https://doi.org/10.1002/star.201500012>
  33. Huang, Q., Chen, X., Wang, S., Zhu, J. (2020). Amylose-Lipid Complex. Chapter in a book: Starch Structure, Functionality and Application in Foods. Singapore: Springer, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0622-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0622-2_5)
  34. Souza, R. C. R., Andrade, C. T. (2000). Investigação dos processos de gelatinização e extrusão de amido de milho. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10(1), 24–30. [Souza, R. C. R., Andrade, C. T. (2000). Investigation of corn starch gelatinization and extrusion processes. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10(1), 24–30. (In Portuguese)] <https://doi.org/10.1590/S0104-14282000000100006>
  35. Pulgarín, O., Larrea-Wachtendorf, D., Ferrari, G. (2023). Effects of the amylose/amylopectin content and storage conditions on corn starch hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). *Gels*, 9(2), Article 87. <https://doi.org/10.3390/gels9020087>
  36. Kalichevsky, M. T., Blanshard, J. M. V. (1993). The effect of fructose and water on the glass transition of amylopectin. *Carbohydrate Polymers*, 20(2), 107–113. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(93\)90085-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(93)90085-1)
  37. Woodbury, T. J., Mauer, L. J. (2023). Oligosaccharide, sucrose, and allulose effects on the pasting and retrogradation behaviors of wheat starch. *Food Research International*, 171, Article 113002. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113002>
  38. Karakelle, B., Kian-pour, N., Tokar, O. S., Palabiyyik, I. (2020). Effect of process conditions and amylose/amylopectin ratio on the pasting behavior of maize starch: A modeling approach. *Journal of Cereal Science*, 94, Article 102998. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102998>
  39. Varghese, S., Awana, M., Mondal, D., Rubiya, M., Melethil, K., Singh, A. et al. (2022). Amylose-amylopectin ratio: Comprehensive understanding of structure, physicochemical attributes, and applications of starch. Chapter in d book: Handbook of biopolymers. Singapore: Springer, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-6603-2\\_48-1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-6603-2_48-1)
  40. Тареп, А. А. (2007). Физико-химия полимеров. Москва: Научный мир, 2007 [Tager, A. A. (2007). Physical chemistry of polymers. Moscow: Nauchny Mir, 2007. (In Russian)]
  41. Горжанов, В. В., Герман, Н. А., Николайчик, И. В. (2025). Оценка эффективности применения крахмалов в клейльном прессе бумагоделательной машины. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*, 1(289), 47–54. [Gorzhanov, V. V., Herman, N. A., Nikolaichik, I. V. (2025). Evaluation of the effectiveness of using starches in the size press of a paper making machine. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 1(289), 47–54. (In Russian)] <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2025-289-6>
  42. Yang, Y., Fu, J., Duan, Q., Xie, H., Dong, X., Yu, L. (2024). Strategies and methodologies for improving toughness of starch films. *Foods*, 13(24), Article 4036. <https://doi.org/10.3390/foods13244036>
  43. Baran, A., Vrábel, P., Kovařáková, M., Hutníková, M., Fričová, O., Olčák, D. (2020). Effects of sorbitol and formamide plasticizers on molecular motion in corn starch studied using NMR and DMTA. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(53), Article 48964. <https://doi.org/10.1002/app.48964>

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | AUTHOR INFORMATION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Принадлежность к организации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Affiliation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p><b>Сотченко Денис Юрьевич</b> — научный сотрудник, лаборатория технологий макаронных и экструдированных продуктов, Центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности<br/>107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А<br/>E-mail: d.sotchenko@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0006-3337-8060">https://orcid.org/0009-0006-3337-8060</a><br/>* автор для контактов</p>                    | <p><b>Denis Yu. Sotchenko</b>, Researcher, Laboratory of Pasta and Extruded Products Technologies, Center for Food Medium Rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry<br/>26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia<br/>E-mail: d.sotchenko@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0006-3337-8060">https://orcid.org/0009-0006-3337-8060</a><br/>* corresponding author</p>                                                                         |
| <p><b>Мартirosян Владимир Викторович</b> — доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности<br/>107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А<br/>E-mail: v.martirosyan@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-4026-5789">https://orcid.org/0000-0002-4026-5789</a></p>                                                                   | <p><b>Vladimir V. Martirosyan</b>, Doctor of Technical Sciences, Professor RAS, Deputy Director for Scientific Work, Scientific Research Institute for the Baking Industry<br/>26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia<br/>E-mail: v.martirosyan@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-4026-5789">https://orcid.org/0000-0002-4026-5789</a></p>                                                                                                                 |
| <p><b>Костюченко Марина Николаевна</b> — кандидат технических наук, директор, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности<br/>107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А<br/>E-mail: m.kostyuchenko@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7854-3513">https://orcid.org/0000-0001-7854-3513</a></p>                                                                                                                | <p><b>Marina N. Kostyuchenko</b>, Candidate of Technical Sciences, Director, Scientific Research Institute for the Baking Industry<br/>26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia<br/>E-mail: m.kostyuchenko@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7854-3513">https://orcid.org/0000-0001-7854-3513</a></p>                                                                                                                                                        |
| <p><b>Балуян Хачатур Александрович</b> — кандидат технических наук, руководитель центра реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности<br/>107553, Москва, ул. Большая Черкизовская, 26А<br/>E-mail: kh.baluyan@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="http://orcid.org/0000-0003-3011-8846">http://orcid.org/0000-0003-3011-8846</a></p>                                                                                     | <p><b>Khachatur A. Baluyan</b>, Candidate of Technical Sciences, Supervisor of the Center for Food Medium Rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry<br/>26A, Bolshaya Cherkizovskaya str., 107553, Moscow, Russia<br/>E-mail: kh.baluyan@gosnihp.ru<br/>ORCID: <a href="http://orcid.org/0000-0003-3011-8846">http://orcid.org/0000-0003-3011-8846</a></p>                                                                                                                       |
| <p><b>Шариков Антон Юрьевич</b> — кандидат технических наук, заведующий отделом оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи<br/>111033, Москва, Самокатная ул. 4-Б<br/>E-mail: anton.sharikov@gmail.com<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-9483-5209">https://orcid.org/0000-0001-9483-5209</a></p> | <p><b>Anton Yu. Sharikov</b>, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department for Food Production Equipment and Membrane Technologies, All-Russian Research Scientific Institute of Food Biotechnology — Subdivision of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety<br/>4B, Samokatnaya str., 111033, Moscow, Russia<br/>E-mail: anton.sharikov@gmail.com<br/>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-9483-5209">https://orcid.org/0000-0001-9483-5209</a></p> |
| <p><b>Жиркова Елена Владимировна</b> — кандидат технических наук, доцент, базовая кафедра индустрии качества, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова<br/>115054, Москва, Стремянный пер, 36<br/>E-mail: zhirkova.ev@rea.ru<br/>ORCID: <a href="http://orcid.org/0000-0002-8934-4162">http://orcid.org/0000-0002-8934-4162</a></p>                                                                                                          | <p><b>Elena V. Zhirkova</b>, Candidate of Technical Sciences, Docent, Basic Department of Quality Industry, Plekhanov Russian University of Economics<br/>36, Stremyanny lane, 115054, Moscow, Russia<br/>E-mail: zhirkova.ev@rea.ru<br/>ORCID: <a href="http://orcid.org/0000-0002-8934-4162">http://orcid.org/0000-0002-8934-4162</a></p>                                                                                                                                                            |
| Критерии авторства                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Contribution                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Конфликт интересов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Conflict of interest                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | The authors declare no conflict of interest                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |