

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 636.086.15:631.527:664.6/7
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-011



Технологическая оценка качества муки диплоидных и тетраплоидных образцов кукурузы

И. А. Кибкало, Э. Б. Хатефов

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Эдуард Балилович Хатефов, haed1967@rambler.ru

Актуальность. Согласно отчету Обсерватории экономической сложности (ОЭС) за 2023 г., мировой рынок кукурузной муки за последние пять лет растет с каждым годом на 5,85%. Положительная динамика обусловлена возросшей популярностью безглютеновых продуктов и инновационными достижениями в технологиях выращивания и переработки кукурузы.

Материалы и методы. Объектом исследования послужили 10 образцов кукурузы шести подвидов с диплоидным и тетраплоидным геномом из коллекции ВИР. Для изучения влияния кукурузного компонента на технологические свойства пшеничной муки при совместной переработке зерна кукурузы и пшеницы были подобраны образцы мягкой пшеницы как среднего, так и низкого качества. Технологические свойства белкового комплекса зерна кукурузы оценивали методом седиментационного анализа. Состояние углеводного комплекса определяли по числу падения на микро-виско-амилографе фирмы Brabender. Биохимический состав зерна кукурузы определяли на ближнем инфракрасном анализаторе (БИК-анализаторе) SupNIR-2750 (Китай). Статистическая обработка данных выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia.

Результаты. Установлены различия между образцами разных подвидов кукурузы по гранулометрическому составу, потенциалу набухания частиц муки, термодинамике крахмала, степени и характеру воздействия на пшеничный компонент при совместной переработке на уровне реологии клейковины, теста и клейстера, а также хлебной выпечки. Показано укрепление белкового комплекса и подавление ферментативных процессов. Выявлена улучшающая способность образцов восковидной кукурузы при совместной переработке с пшеницей на качество теста, дана оценка образцам мукомольного, крупяного и кормового направления. Наиболее инертны при совместной переработке с пшеницей образцы сахарной кукурузы.

Заключение. Выявленные различия у изученных образцов по технологическим свойствам и внутри технологических групп позволяют вести селекционный отбор по этим признакам.

Ключевые слова: кукурузная мука, пшеничная мука, хлеб, технологическая оценка, диплоид, тетраплоид, зеин, глютен

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственного задания по теме № FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Для цитирования: Кибкало И.А., Хатефов Э.Б. Технологическая оценка качества муки диплоидных и тетраплоидных образцов кукурузы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):69-82. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-011

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-011

Technological assessment of the quality of flour from diploid and tetraploid maize accessions

Ilya A. Kibkalo, Eduard B. Khatefov

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Eduard B. Khatefov, haed1967@rambler.ru

Background. According to the 2023 report of the Observatory of Economic Complexity (OEC), the global maize flour market has been growing by 5.85% annually over the past five years. This positive trend is driven by the increased popularity of gluten-free products and innovative advances in maize cultivation and processing technologies.

Materials and methods. Ten accessions of six maize subspecies with diploid and tetraploid genomes from the VIR collection were analyzed. Bread wheat accessions with medium and poor flour quality were selected to assess the effect of the maize component on the technological properties of composite flour. Sedimentation analysis was used to evaluate technological properties of the grain protein complex in maize. The carbohydrate complex was determined by the falling number using a Brabender Micro Visco-Amylo-Graph. Biochemical composition of maize grain was quantified with a SupNIR-2750 analyzer (China). Statistical data processing was performed using Statistica 10.0 software from StatSoft Russia (2023).

Results. The studied maize subspecies manifested differences in particle size distribution, swelling potential of flour particles, starch thermodynamics, the degree and nature of the impact on the wheat component during combined processing at the level of the rheology of gluten, dough and paste, as well as bread baking. Strengthening of the protein complex and suppression of enzymatic processes were shown. Waxy maize was found to have an improving effect on the composite wheat-maize dough. Promising accessions were also identified for flour, cereal and feed uses. Sweet maize accessions were the most inert during combined processing with wheat grain.

Conclusion. The differences in technological properties, revealed among the tested accessions and within technological groups, make it possible to perform selection breeding for these properties.

Keywords: maize flour, wheat flour, bread, technological assessment, diploid, tetraploid, zein, gluten

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task, Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

For citation: Kibkalo I.A., Khatefov E.B. Technological assessment of the quality of flour from diploid and tetraploid maize accessions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):69-82. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-011

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Мировой рынок кукурузной муки демонстрирует тенденцию к устойчивому росту на следующее десятилетие, что обусловлено ростом популярности безглютеновых продуктов, универсальностью кукурузной муки в различных кухнях мира и инновационными достижениями в технологиях выращивания кукурузы и переработки кукурузной муки. Сектор переработки охватывает различные типы кукурузной муки, включая цельнозерновую, дезагрегированную и маса-муку, а также инновационные продукты, создаваемые на ее основе. Согласно отчету Future Market Insights (FMI), мировой спрос на кукурузную муку будет расти на 6,3% с 2023 по 2033 г., достигнув в общей сложности 34,52 млрд долларов США в 2033 г.

Различные хлебобулочные изделия, потребляемые во всем мире, требуют пшеничной муки с определенными вязкоупругими характеристиками, которые не всегда доступны на рынке. Чтобы удовлетворить эти требования, мукомольные и хлебопекарные предприятия используют различные ингредиенты и технологические добавки. Улучшающие агенты воздействуют на клейковинную сеть и другие компоненты муки, адаптируя их для производства продуктов с желаемыми технологическими и сенсорными свойствами. Многие исследования связывают увеличение параметров, полученных при фаринографическом, экстенсографическом, альвеографическом и других анализах качества, с эффектом усиления муки различными ингредиентами и технологическими добавками (Ferreira et al., 2025). Достойное место среди улучшающих агентов занимает кукурузная мука, которую часто добавляют в продукты питания благодаря высокой пищевой ценности и благотворному влиянию на здоровье человека (Guadarrama-Lezama et al., 2016).

Кукурузная мука состоит из эндосперма: от 75 до 87% крахмала и 6–8% белка (Arendt, Dal Bello, 2008). Зеин – запасной белок эндосперма кукурузы – составляет около 70% от общего количества белка зерновки, относится к спирторастворимым запасным белкам; накапливается в так называемых белковых телах (Holding, Larkins, 2009; Wu, Messing, 2014). Он характеризуется высоким содержанием глутамина, лейцина и пролина, но практически лишен лизина и триптофана. Молотое зерно кукурузы используется для получения таких продуктов, как кукурузная мука и крахмал, masa harina (мука для приготовления массы). Технологические и питательные свойства кукурузы зависят от таких характеристик зерна, как твердость, размер, форма, соотношения амилозы и амилопектина, содержание белка, липидов, которые во многом зависят от подвида, сорта, метода помола, технологии обработки зерна (Caballero-Rothar et al., 2022; An et al., 2023).

Поскольку кукуруза считается безглютеновым злаком, ее можно использовать в производстве безглютеновых продуктов питания, например хлеба. В качестве связующих веществ для замены глютена в рецептуре хлеба используются ксантан, камеди гуарового и рожкового дерева, трагакант. Использование вышеуказанных составляющих приводит к увеличению объема буханки и разрыхлению структуры мякиша. Кукурузная мука, будучи безглютеновой, в составе смеси снижает общее содержание глютена, что приводит к более мягкой текстуре теста и выпечки, в том числе кондитерских изделий. Кукурузная мука может увеличивать водопоглощение, повышать термическую стабильность и замедлять со-

зревание теста (песочного, пряничного, для печенья). Количество добавляемой кукурузной муки оказывает влияние на характеристики и качество обработки смешанного теста (De Alcântara et al., 2020; Gu et al., 2023), а также физико-химические свойства композитной муки (Vásquez et al., 2016). Исследования О. П. Храпко и др. (Khrapko et al., 2022) показали влияние высоколизиновой кукурузной муки на физико-химические показатели и органолептические свойства готовой продукции. Результатом их работы стало создание рецептуры хлеба «Солнечный» с добавлением 10% высоколизиновой кукурузной муки.

Цель нашей работы – выявление потенциала коллекционных образцов различных подвигов кукурузы для производства хлебопекарной продукции.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовали 10 образцов зубовидного, полужубовидного, кремнистого, лопающегося, восковидного и сахарного подвигов кукурузы из коллекции ВИР (Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова), которые были представлены шестью образцами диплоидной и четырьмя образцами тетраплоидной кукурузы пищевого назначения (табл. 1). Хлебопекарные свойства образцов ранее не изучались, зерновки отличались между собой консистенцией, химическим составом и типом эндосперма. Результаты текущего исследования имеют предварительный характер.

Размножение семян опытных образцов проводили под пергаментными изоляторами для сохранения типичности и однородности, в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики (г. Прохладный, 43°45'00" с. ш., 44°02'00" в. д.) в 2023 г. Почвенный покров участка представлен среднетяжелосуглинистым черноземом, содержащим карбонаты, и характеризуется низким содержанием гумуса (до 3%). Содержание азота в почве составляет 13,2 мг/кг, что соответствует средним показателям. Содержание подвижного фосфора и обменного калия, определенного по методу Мачигина, является повышенным (33 мг/кг) и средним (220 мг/кг) соответственно. Кислотность почвы близка к нейтральной (7,4). Схема посева опытных образцов: 70 × 35 см, широкояровая, площадь делянки – 4,9 м². Агротехника соответствовала методическими рекомендациям (Sotchenko, 2009).

Технологические свойства белкового комплекса зерна кукурузы оценивали методом седиментации (Kibkalo, 2022). О состоянии углеводного комплекса судили по числу падения и данным прибора микро-виско-амилографа фирмы Brabender.

Реологические свойства теста смесевых образцов (30% кукурузы и 70% пшеницы) оценивали на фаринографе фирмы Brabender. В ходе исследований производили отмывку сырой клейковины с контролем ее качества на приборе ИДК-3М. Для этого анализа к 25 г цельнозерновой пшеничной муки добавляли 5 г размолотого кукурузного зерна. Была произведена лабораторная пробная выпечка как формового, так и подового хлеба из смесевых образцов с использованием сортовой пшеничной муки лабораторного помола (70-процентный выход). В первом случае использовали пшеничную муку среднего качества, согласно предварительно проведенному анализу качества клейковины и числу падения (ЧП), во втором – низкого качества (со слабой клейковиной и низким числом падения). Смесевые образцы при этом

Таблица 1. Образцы коллекции кукурузы ВИР, использованные в опыте**Table 1. Maize accessions from the VIR collection used in the experiment**

№ по каталогу ВИР	Наименование образца	<i>Zea mays</i> L. subspecies	Плоидность	Цвет зерна
Образцы мукомольного назначения				
23994	‘Кабардинская Белая Зубовидная’	<i>indentata</i> Sturt.	2n	белое
25204	‘Белозерная Тетраплоидная’	<i>semidentata</i> Kulesch.	4n	белое
Образцы крупяного назначения и для производства попкорна				
23995	‘Местная Белая Кремнистая’	<i>indurata</i> Sturt.	2n	белое
25199	Попкорн	<i>everta</i> Sturt.	2n	желтое
Образцы кормового назначения				
23400	‘Кабардинская 3812’	<i>semidentata</i> Kulesch.	2n	желтое
23427	‘Тетра-1’	<i>semidentata</i> Kulesch.	4n	желтое
Образцы сахарной кукурузы пищевого назначения для употребления в свежем и консервированном виде				
23993	‘Ранняя Лакомка’	<i>saccharata</i> (Sturt.) Zhuk.	2n	желтое
23426	‘Баксанская Сахарная’	<i>saccharata</i> (Sturt.) Zhuk.	4n	желтое
Образцы, предназначенные для получения амилопектинового крахмала				
23388	‘Восковидная Диплоидная’	<i>ceratina</i> Kulesch.	2n	желтое
25205	‘Восковидная Тетраплоидная’	<i>ceratina</i> Kulesch.	4n	желтое

формировались также в соотношении 30% к 70%. Для оценки взаимного влияния углеводно-амилазного комплекса зерна кукурузы и пшеницы проводили оценку числа падения в двух смесевых вариантах: к 7 г размолотого кукурузного зерна добавляли 1 г амилазно-активного пшеничного материала (пророщенная пшеница, высушенная и смолотая), а также к 5 г цельнозерновой муки среднего качества (с числом падения 159 с) добавляли 2 г кукурузной муки. В качестве пшеничного компонента среднего качества для фаринографического исследования, определения числа падения, показателя ИДК и формовой выпечки использовалось зерно сорта мягкой пшеницы ‘Памяти Суслыкова’ (к-67338). В опыте с подовой выпечкой использовалось зерно сорта мягкой пшеницы ‘Акмолинка 1’ (к-38515) низкого качества.

Для оценки физических свойств эндосперма кукурузного зерна провели ситовой анализ продуктов его размола с использованием сит с проходными отверстиями 0,3; 0,25; 0,16 и 0,106 мм. Размол кукурузного зерна проводили на лабораторной мельнице циклонного типа ЛМЦ-5, пшеницы – на мельнице LM 3100 (Perten). Твердость хлебного мякиша определяли на структурометре СТ-2. Сортную муку получали на лабораторной мельнице Quadrumat Junior фирмы Brabender (Германия). Биохимический состав зерна кукурузы определяли на БИК-анализаторе SupNIR-2750 (Китай). Статистическая обработка данных: М – среднее арифметическое; Me – медиана (середица ряда); σ (сигма) – стандартное (среднеквадратическое) отклонение; C_v , % – коэффициент вариации (мера относительного разброса); m – стандартная ошибка среднего – проведена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia (<https://1soft.space/en/statsoft-statistica>).

Результаты и обсуждение

Анализ результатов размола зерна: распределение на фракции по размеру частиц может зависеть от консистенции эндосперма и твердозерности, на которые оказывают влияние «плотность упаковки» белковых макромолекул, размер и структурность крахмальных зерен. В нашем опыте отмечены заметные различия между образцами по представленности фракций гранулометрического состава (табл. 2).

Кроме этого, выявлены и различия между хозяйственными группами образцов кукурузы (см. табл. 1). Практически все образцы имели наибольшие или значительные фракции на ситах 0,16 и 0,106 мм. Наибольшие различия обнаружены по представленности самой крупной (0,3 мм) и самой мелкой (менее 0,106 мм) фракций. Максимальные значения самой крупной фракции размола зерна имели кормовые образцы (22,5–33,2%), а также образцы сахарной кукурузы (19,5–22,9%), которые можно признать наиболее твердозерными. Далее расположились образцы крупяного назначения и для производства попкорна (19,9–19,0%). Наиболее мучнистыми (максимальные значения самой мелкой фракции) оказались образцы мукомольного назначения (22,0–18,4%) и образцы для получения амилопектинового крахмала (далее в тексте: «для получения крахмала») (21,7–18,0%).

Технологический потенциал зерновых культур можно определить по способности частиц размола кустойчивому набуханию, которое лежит в основе многих циклов переработки зерна (Kibkalo, 2022). На величину седиментационного осадка значительно влияют свойства запасных белков зерна. Двухступенчатый седиментационный анализ, примененный нами, позволяет оценить

Таблица 2. Фракции гранулометрического состава продуктов размола зерна кукурузы, %
Table 2. Particle size distribution fractions in maize grain milling products, %

Образец	Размер проходных отверстий сит, мм				
	0,3	0,25	0,16	0,106	< 0,106 мм
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	13,1	10,0	25,9	29,0	22,0
‘Белозерная Тетраплоидная’	14,5	11,3	29,4	26,4	18,4
‘Местная Белая Кремнистая’	19,0	9,7	26,8	27,7	16,8
‘Баксанская Сахарная’	19,5	9,2	32,0	29,5	9,8
‘Ранняя Лакомка’	22,9	3,4	23,8	39,9	10,0
‘Восковидная Тетраплоидная’	16,8	5,1	39,2	17,2	21,7
‘Восковидная Диплоидная’	9,7	5,5	29,3	37,5	18,0
‘Кабардинская 3812’	22,5	8,8	24,6	32,8	11,3
‘Тетра-1’	33,2	7,2	39,5	13,9	6,2
Попкорн	19,5	10,0	28,7	27,0	14,8
M ± m	19,07 ± 2,15	8,02 ± 0,86	29,92 ± 1,85	28,09 ± 2,67	14,90 ± 1,79
Me	19,25	9,0	29,0	28,35	15,8
σ	6,46	2,59	5,54	8,01	5,38
C _v , %	33,89	32,30	18,50	28,51	36,13

способность к набуханию частиц при разных уровнях физико-химической нагрузки и оценить устойчивость к ним. Анализируемые образцы, как правило, разделяются на три группы: первая быстро раскрывает свой потенциал и испытывает деструкцию частиц размола при продолжении или увеличении физико-химической нагрузки, вторая способна сохранять устойчивость достигнутого раскрытия потенциала, третья – для раскрытия потенциала необходимо увеличение физико-химической нагрузки (Kibkalo et al., 2024). В нашем опыте все образцы можно было отнести к третьей группе (табл. 3). Отношение Ф2/Ф1 было значительно больше единицы.

Наибольшим потенциалом набухания по сумме осадков двух фаз анализа обладали образцы кормового назначения (115–116 мл) и образцы, предназначенные для получения крахмала (125–110 мл). И если в первом случае, по аналогии с зерном пшеницы, высокая способность к набуханию соотносится с твердозерностью зерна, то во втором напрашивается вывод об участии специфической структуры крахмала образцов в обеспечении устойчивости объема седиментационного осадка, что является уникальным свойством. Следует отметить, что данные образцы не имели сильных отличий от других по биохимическому составу. Исключение составило лишь более низкое содержание масла (табл. 4). Возможно отчасти, что снижение гидрофобности продуктов размола могло способствовать лучшему их набуханию. Наименьший потенциал набухания показали образцы сахарной кукурузы, обладающие повышенной масличностью.

В силу распространенности совместной переработки зерна пшеницы и кукурузы для создания функциональных продуктов питания большой интерес представляло изучение влияния характеристик зерна этих культур на качество смесового продукта. Результаты отмывки клейковины (табл. 5) показали общую тенденцию к уменьше-

нию содержания сырой клейковины в смесевых образцах по сравнению с контролем (пшеница) за счет снижения ее оводненности. Содержание сухой клейковины у нескольких образцов из разных хозяйственных групп сохранялось на уровне контроля. Однако у некоторых образцов наблюдалось уменьшение и сухого вещества. У образца ‘Кабардинская Белая Зубовидная’ при тенденции к уменьшению не только сырой клейковины, но и сухого вещества гидратация клейковины сохранялась на уровне контроля.

Полученные данные свидетельствуют о том, что кукурузный материал в данном опыте не имел очевидной интеграции с пшеничной клейковиной; вместе с тем было выявлено существенное изменение физических свойств клейковины из смесевых образцов по отношению к контролю в сторону упрочнения. Существенно снизился показатель упруго-вязких свойств по ИДК, сократились растяжимость и расплываемость сырой клейковины (см. табл. 5). Причем образцы значительно различались между собой по степени зарегистрированных изменений. Максимальный эффект упрочнения клейковины наблюдался у смесевых образцов с добавлением сахарной кукурузы. Наиболее близкой по физическим свойствам к исходному образцу пшеницы оставалась клейковина, отмываемая из смеси с включением образцов ‘Кабардинская Белая Зубовидная’ и Попкорн. Судя по всему, упрочнение пшеничной клейковины происходило за счет вымывания из смесевых образцов ее наиболее «слабых» гидратированных фракций. Тем не менее расплываемость клейковины смесевых образцов оказалась существенно связана ($r = 0,83^*$) с критерием устойчивости белкового комплекса кукурузы к физико-химическим нагрузкам (Ф2/Ф1), что может говорить о частичной замене отдельных фракций пшеничной клейковины белковым комплексом кукурузы.

Таблица 3. Величина седиментационного осадка, мл
Table 3. Sedimentation volume values, mL

Образец	1-я фаза (Ф1)	2-я фаза (Ф2)	Ф2/Ф1	Общий потенциал набухания (Ф1+Ф2)
'Кабардинская Белая Зубовидная'	38	60	1,58	98
'Белозерная Тетраплоидная'	38	56	1,47	94
'Местная Белая Кремнистая'	40	59	1,48	99
'Баксанская Сахарная'	35	46	1,31	81
'Ранняя Лакомка'	28	41	1,46	69
'Восковидная Тетраплоидная'	50	75	1,50	125
'Восковидная Диплоидная'	42	68	1,62	110
'Кабардинская 3812'	42	73	1,74	115
'Тетра-1'	44	72	1,64	116
Попкорн	36	54	1,50	90
M ± m	39,30 ± 1,96	60,40 ± 3,87	1,53 ± 0,04	99,70 ± 5,74
Me	39	59,5	1,5	98,5
σ	5,89	11,60	0,12	17,22
C _v , %	14,98	19,2	7,8	17,3

Таблица 4. Биохимический состав зерна кукурузы
Table 4. Biochemical composition of maize grain

Образец	Масло	Клетчатка	Белок	Крахмал
'Кабардинская Белая Зубовидная'	4,17	3,17	11,51	69,29
'Белозерная Тетраплоидная'	3,91	3,0	12,61	68,44
'Местная Белая Кремнистая'	3,93	2,81	10,66	70,11
'Баксанская Сахарная'	4,56	2,37	11,97	69,87
'Ранняя Лакомка'	5,34	2,53	11,95	70,36
'Восковидная Тетраплоидная'	2,84	2,7	13,29	67,94
'Восковидная Диплоидная'	2,8	3,03	10,99	70,75
'Кабардинская 3812'	3,94	2,88	12,51	68,74
'Тетра-1'	3,73	3,36	12,33	67,95
Попкорн	4,22	3,56	14,05	65,59
M ± m	3,94 ± 0,25	2,94 ± 0,12	12,19 ± 0,34	68,90 ± 0,51
Me	3,935	2,94	12,15	69,015
σ	0,75	0,36	1,02	1,53
C _v , %	18,96	12,40	8,35	2,22

Эффект укрепления белкового каркаса смесевых образцов теста наблюдался и по результатам фаринографирования (табл. 6).

Отмечалось существенное сокращение водопоглотительной способности материала в смесевых образцах по отношению к контролю, увеличивалось время образо-

вания теста, стабильность теста, число валориметра, и в большинстве случаев значительно сокращалось разжижение теста. Однако распределение по интенсивности воздействия «кукурузной составляющей» на пшеничный материал оказалось иным, чем при изучении клейковины. Наиболее приближенные к пшеничным физические

Таблица 5. Физические свойства клейковины из смесевых образцов
Table 5. Physical properties of gluten in composite product samples

Образец	Содержание сырой клейковины*, %	Содержание сухой клейковины*, %	Гидратация клейковины, %	Показатель ИДК, ед. пр.**	Растяжимость клейковины, см	Распльваемость клейковины, мм
'Кабардинская Белая Зубовидная'	33	11,7	184	80,7	18	73
'Белозерная Тетраплоидная'	33,2	12,8	160	72,9	20	68
'Местная Белая Кремнистая'	32,5	12,3	165	71,4	17,5	66
'Баксанская Сахарная'	29,8	11,5	160	65,5	17,5	62
'Ранняя Лакомка'	32,2	12,4	160	59,2	15,5	65
'Восковидная Тетраплоидная'	29,3	11,1	163	70,8	18	67
'Восковидная Диплоидная'	31,8	11,9	161	71	17,5	67
'Кабардинская 3812'	34,5	12,6	174	76,2	21,5	73
'Тетра-1'	33,7	12,6	169	74,3	22	70
Попкорн	32,8	12	174	82,8	21	69
Пшеница	35,8	12,5	186	84,7	26	79
M ± m	32,6 ± 0,59	12,13 ± 0,17	168,73 ± 3,04	73,59 ± 2,36	19,50 ± 0,94	69,00 ± 1,47
Me	32,8	12,3	165	72,9	18	68
σ	11,8	0,53	9,60	7,47	2,96	4,65
C _v , %	5,75	4,40	5,69	10,15	15,17	6,74

Примечание: * – расчет % произведен от 25 г пшеничного материала; ** – единицы прибора

Note: * – the percentage was calculated for 25 g of wheat material; ** – instrument units

Таблица 6. Реологические свойства теста смесевых образцов
Table 6. Rheological properties of the dough from composite product samples

Образец	Водопоглотительная способность, %	Время образования теста, мин	Стабильность, мин	Разжижение, ед. пр.*	Число валориметра, ед. пр.*
'Кабардинская Белая Зубовидная'	60	4,03	2,23	28	64
'Белозерная Тетраплоидная'	59	5,33	6,93	12	68
'Местная Белая Кремнистая'	59	4,25	8,33	22	66
'Баксанская Сахарная'	65	4,62	2,03	94	53
'Ранняя Лакомка'	65	3,82	1,08	141	47
'Восковидная Тетраплоидная'	61	8,8	13,45	12	76
'Восковидная Диплоидная'	61	9	13,38	18	78
'Кабардинская 3812'	61	8,95	10,6	19	78
'Тетра-1'	60	8,27	9,73	18	76
Попкорн	59	7,4	9,14	17	72
Пшеница	70	3,2	0,87	143	41
M ± m	61,82 ± 1,09	6,15 ± 0,74	7,07 ± 1,51	47,64 ± 16,45	65,36 ± 4,10
Me	61	5,33	8,33	19	68
σ	3,46	2,33	4,79	52,02	12,97
C _v , %	5,60	37,88	67,7	109,2	19,84

Примечание: * – единицы прибора

Note: * – instrument units

свойства теста имели смесевые образцы с добавлением сахарной кукурузы. Максимально укрепляли тесто образцы кукурузы для получения крахмала и кормового назначения, а также образец Попкорн. Объяснить полученные результаты можно тем, что запасные вещества зерновок кукурузы и пшеницы находились в постоянном взаимодействии во время реологических испытаний теста. Данные фаринографирования оказались согласованы с седиментационной оценкой. Так, время образования теста (ВОТ) оказалось достоверно связано с Ф1 (0,71*), Ф2 (0,80*), Ф1+Ф2 (0,79*); стабильность теста – с Ф1 (0,82*), Ф2 (0,83*), Ф1+Ф2 (0,84*); разжижение теста – с Ф1 (-0,77*), Ф2 (-0,78*), Ф1+Ф2 (-0,79*); число валориметра – с Ф1 (0,83*), Ф2 (0,91*); Ф1+Ф2 (0,90*), а также с Ф2/Ф1 (0,71*).

Свойства крахмала, который часто называют углеводно-амилазным комплексом, обычно не зависят от свойств белков, но вместе могут влиять на технологические свойства зерна разных злаковых культур, обуславливая их различие между собой. Для оценки состояния углеводного комплекса у кукурузы различных хозяйственных групп, его влияния на технологические свойства провели анализ продуктов размола зерна на микровиско-амилографе по протоколу испытаний для кукурузного крахмала с увеличенной навеской экспериментального материала (15 г), а также измерили число падения (ЧП). Ранее, при выявлении существенных различий между разными сортами кукурузы (Kibkalo, Zhuk, 2022), была принята следующая схема испытаний. Сначала оце-

нивалось ЧП «чистого» кукурузного материала (7 г), затем с добавлением 1 г пшеницы с высокой амилазной активностью и смесевых образцов (5 г пшеницы со средним значением ЧП (159 с) + 2 г кукурузы). Такая модель позволяет изучить вязкость крахмала при образовании клейстера, косвенно определить его атакуемость (способность к гидролизу под воздействием амилаз), а также понять, как он влияет на свойства пшеничного крахмала при их совместной переработке. Результаты опыта представлены в таблице 7.

Образцы кукурузы по ЧП продемонстрировали максимально возможное разнообразие – от 60 до 900 секунд. Наибольшую вязкость клейстера показали образцы 'Белозерная Тетраплоидная' и Попкорн. Минимальное ЧП закономерно оказалось у образцов сахарной кукурузы и образцов для получения крахмала, хотя образец 'Восковидная Диплоидная' несколько отличался большей вязкостью. Неожиданно в этой же группе оказался образец кормового назначения 'Кабардинская 3812', что также говорит о характере структуры его крахмала. При добавлении пшеницы с высокой активностью амилазы в целом наблюдалась тенденция: чем выше изначальное значение ЧП, тем более сильным было разжижение клейстера. Однако образцы с максимальным значением ЧП различались по данному показателю. Образец Попкорн сильнее снижал вязкость клейстера, чем 'Белозерная Тетраплоидная', что свидетельствует о более низкой атакуемости крахмала последнего. Образцы кукурузы, изначальное ЧП которых было достаточно высоким, проде-

Таблица 7. Число падения образцов кукурузы и смесевых образцов
Table 7. Falling number of maize accessions and composite product samples

Образец	Число падения, с	Число падения при добавлении амилазно-активной добавки, с	Снижение числа падения, с	Число падения смесевых образцов, с
'Кабардинская Белая Зубовидная'	526	422	104	166
'Белозерная Тетраплоидная'	900	627	273	177
'Местная Белая Кремнистая'	472	343	129	165
'Баксанская Сахарная'	60	60	–	117
'Ранняя Лакомка'	60	60	–	96
'Восковидная Тетраплоидная'	60	60	–	82
'Восковидная Диплоидная'	96	68	28	104
'Кабардинская 3812'	61	60	1	172
'Тетра-1'	633	465	168	162
Попкорн	900	361	539	136
Пшеница	159	60	99	–
M ± m	357,00 ± 108,04	235,09 ± 67,09	121,91 ± 51,75	125,18 ± 16,88
Me	159	68	99	136
σ	341,65	212,15	163,66	53,39
C _v , %	95,7	90,24	134,25	42,65

монстрировали заметную устойчивость к действию α -амилазы. Однако ни один из них не продемонстрировал высокую смесительную способность: они лишь незначительно улучшали показатель пшеницы или находились на одном уровне с ним. Образцы с изначально низким значением ЧП закономерно ухудшали пшеничный показатель. Исключение составил образец 'Кабардинская 3812', что вызывает еще больший интерес к строению его крахмала.

Испытание термодинамических свойств крахмала на виско-амилографе отличается от определения ЧП принципом температурного воздействия. Если в последнем случае крахмальная взвесь сразу помещается в высоко-температурную среду, что вызывает стремительное заваривание клейстера, то при испытании на виско-амилографе температура среды поднимается постепенно. При достижении максимальной температуры (92°C) осуществляется выдержка с дальнейшим принудительным охлаждением до 50°C, что обычно вызывает очередное повышение вязкости клейстера, который в течение анализа подвергается механическому воздействию (перемешивание).

Изученные образцы кукурузы продемонстрировали разнообразную конфигурацию виско-амилограмм (рис. 1). Низкую вязкость клейстера на протяжении всего испытания показали образцы сахарной кукурузы (см. рис. 1, № 3 и № 4), что полностью согласуется с данными ЧП. Образцам с низким ЧП режим нагревания опыта позволил лучше реализовать свой потенциал вязкости.

Образец Попкорн (см. рис. 1, № 10), имеющий максимально возможное ЧП, напротив, показал скромные результаты, уступив по вязкости на всех этапах испытания другим образцам, кроме сахарной кукурузы, показав, что для реализации его потенциала вязкости необходим быстрый нагрев. Уникальную виско-амилограмму продемонстрировал образец 'Восковидная Диплоидная' (см. рис. 1, № 6). Клейстер этого образца образовал два равноценных пика густоты – как при нагревании, так и при охлаждении. Причем пик при нагревании образовался задолго до наступления максимальных температур и характеризовал самую высокую вязкость клейстера в горячем состоянии из всех представленных образцов. Самую же высокую вязкость охлажденного клейстера имели образцы мукомольного назначения, а также кормовой образцы 'Тетра-1' (4n) (см. рис. 1, №№ 1, 2, 8).

Если говорить о совместной переработке кукурузы и пшеницы, то наиболее распространенным итоговым продуктом является хлеб. Поэтому технологическая характеристика образцов зерна кукурузы была бы неполной без хлебопекарной оценки, где происходит реализация потенциала всех запасных веществ зерна и в полной степени отражается смесительная способность. В связи с чем провели два опыта с лабораторной пробной микровыпечкой. В первом варианте в качестве тестера использовалась пшеничная мука лабораторного помола (70-процентный выход) среднего качества (филлер), пригодная для хлебопечения без улучшителей – со средними значениями реологических свойств теста, клейковины, ЧП, которая использовалась в качестве контроля в соответствующих испытаниях. Произведена формовая выпечка из 25 г муки в соотношении 70% пшеницы на 30% кукурузы. Результаты представлены в таблице 8 и на рисунке 2.

Смесевые образцы хлеба имели различия как между собой, так и по сравнению с контролем. Общая тенденция заключалась в том, что при добавлении 30% ку-

курузного материала к пшенице-филлеру значительно снижался объем хлеба, пористость становилась более грубой, мякиш – более твердым и плотным. Однако в большинстве случаев значительно снижалась скорость черствения. Наилучшим образом в данном опыте продемонстрировали себя образцы сахарной кукурузы, показав самый высокий из смесевых образцов объем хлеба, невысокую твердость мякиша как после выпечки, так и через сутки при средней скорости черствения. Вероятно, таким образом сказались инертность крахмала данных образцов, отмеченная в предыдущих испытаниях, а возможно – и повышенное содержание масла. Хлеб с добавлением образца Попкорн обладал довольно высоким объемом по сравнению с другими вариантами, но значительной твердостью мякиша и скоростью черствения. Самый низкий объем хлеба и очень твердый мякиш оказался у смесевых образцов с включением кукурузы для получения крахмала, а также с мукомольным образцом 'Кабардинская Белая Зубовидная' (2n). В целом образцы, предназначенные для получения крахмала, и образцы мукомольного назначения имели очевидные различия между собой внутри хозяйственных групп. Первые значительно разошлись по скорости черствения. Добавление образца 'Восковидная Тетраплоидная' придавало хлебному мякишу одну из самых высоких скоростей черствения, а 'Восковидная Диплоидная' – одну из самых низких. Возможно, что таким образом сказались различия в термодинамических характеристиках крахмала этих образцов, отмеченная ранее. В результате хлеб с добавлением образца 'Восковидная Тетраплоидная' оказался самым черствым через сутки после выпечки, а с образцом 'Восковидная Диплоидная', напротив, превзошел по органолептическим свойствам пшеничный хлеб. Образцы мукомольного назначения различались между собой по объему хлеба с их включением; твердость мякиша этого хлеба также различалась: она была самой высокой, а скорость черствения – самой низкой. В результате через сутки после выпечки твердость хлебного мякиша с добавлением образца 'Кабардинская Белая Зубовидная' (2n) была выше, чем у контроля, а с образцом 'Белозерная Тетраплоидная' – ниже и уступала по мягкости только хлебу с включением образцов сахарной кукурузы.

В предварительных испытаниях кукуруза продемонстрировала укрепление белкового комплекса пшеницы и определенную устойчивость к ферментативным нагрузкам; интерес представляла хлебопекарная оценка со слабым пшеничным компонентом. Для этого произвели лабораторную пробную микровыпечку подового хлеба из 15 г муки, где в качестве тестера использовалась мука пшеницы, характеризующаяся слабой клейковиной и пониженным ЧП. Соотношение пшеницы и кукурузы оставалось прежним (70% на 30%). Результаты анализа представлены на рисунке 3 и в таблице 9.

Результаты анализа оказались противоположными полученным при изучении формового хлеба (см. выше). Добавление кукурузной муки, как правило, приводило к улучшению формоустойчивости хлеба (h/d), улучшению пористости. Однако твердость мякиша оказалась по-прежнему наименьшей у пшеничного хлеба, причем этот результат сохранялся и через сутки после выпечки. Незначительно уступал по этому показателю пшеничному хлебу с добавлением сахарной кукурузы 'Ранняя Лаконка' (2n). Другой сорт сахарной кукурузы 'Баксанская Сахарная' (4n) придавал хлебу самую низкую скорость черствения, однако по мягкости мякиша через сутки после выпечки этот образец все же уступал двум лучшим

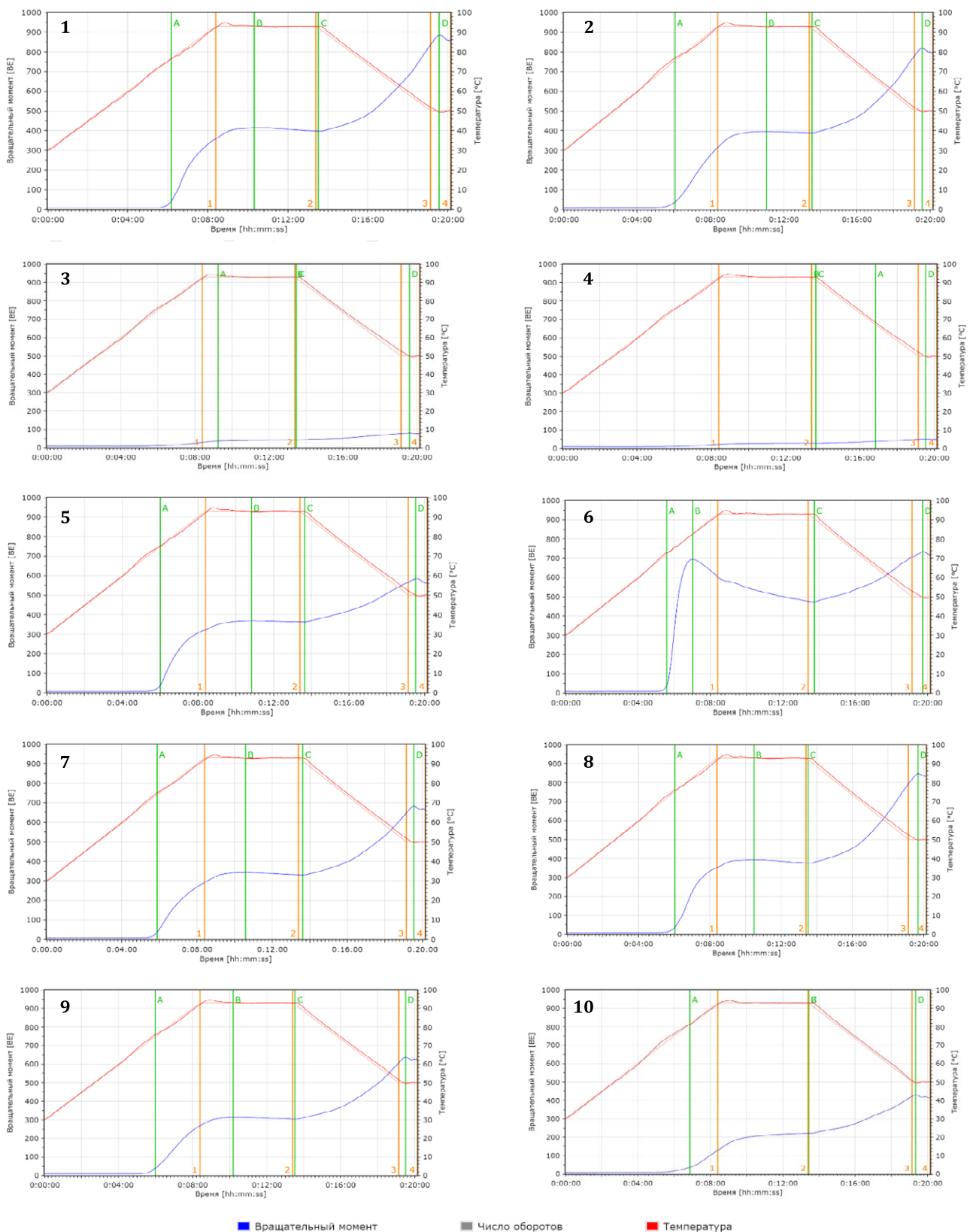


Рис. 1. Термодинамические свойства крахмала в продуктах размола кукурузного зерна по виско-амилограмме: 1 – ‘Кабардинская Белая Зубовидная’ (2n); 2 – ‘Белозерная Тетраплоидная’ (4n); 3 – ‘Баксанская Сахарная’ (4n); 4 – ‘Ранняя Лакомка’ (2n); 5 – ‘Восковидная Тетраплоидная’ (4n); 6 – ‘Восковидная Диплоидная’ (2n); 7 – Кабардинская 3812 (2n); 8 – ‘Тетра-1’ (4n); 9 – ‘Местная Белая Кремнистая’ (2n); 10 – Попкорн

Fig. 1. Thermodynamic properties of starch in maize grain milling products according to the visco-amylogram: 1 – ‘Kabardinskaya Belaya Zubovidnaya’ (2n); 2 – ‘Belozernaya Tetraploidnaya’ (4n); 3 – ‘Baksanskaya Sakharnaya’ (4n); 4 – ‘Rannaya Lakomka’ (2n); 5 – ‘Voskovidnaya Tetraploidnaya’ (4n); 6 – ‘Voskovidnaya Diploidnaya’ (2n); 7 – ‘Kabardinskaya 3812’ (2n); 8 – ‘Tetra-1’ (4n); 9 – ‘Mestnaya Belaya Kremnistaya’ (2n); 10 – Popcorn

Таблица 8. Результаты лабораторной формовой пробной выпечки пшенично-кукурузного хлеба**Table 8. Results of the laboratory pan-baking test for wheat-maize bread**

Образец	Объем хлеба, мл*	Плотность мякиша, г/мл	Твердость мякиша, г нагрузки	Черствение мякиша за сутки, г нагрузки	Твердость мякиша через сутки, г нагрузки
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	232	0,57	5812	1556	7368
‘Белозерная Тетраплоидная’	272	0,48	4116	1707	5823
‘Местная Белая Кремнистая’	272	0,5	3565	2795	6360
‘Баксанская Сахарная’	292	0,49	2447	2158	4605
‘Ранняя Лакомка’	288	0,51	2053	3531	5584
‘Восковидная Тетраплоидная’	232	0,52	4066	5720	9786
‘Восковидная Диплоидная’	248	0,52	4044	1977	6021
‘Кабардинская 3812’	272	0,46	3765	3307	7072
‘Тетра-1’	260	0,46	3997	3554	7551
Попкорн	280	0,48	3430	4355	7785
Пшеница	400	0,42	1790	5074	6864
M ± m	277,1 ± 14,4	0,49 ± 0,01	3553,18 ± 357,25	3248,55 ± 436,97	6801,73 ± 434,77
Me	272	0,49	3765	3307	6864
σ	45,54	0,04	1129,74	1381,81	1374,87
C _v ,%	16,44	8,2	31,8	42,54	20,21

Примечание: * – перерасчет на 100 г муки

Note: * – recalculated per 100 g of flour

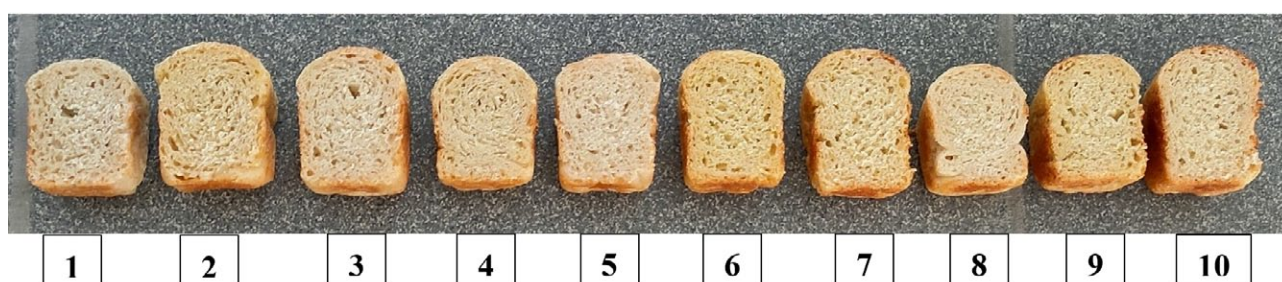


Рис 2. Лабораторная формовая пробная выпечка пшенично-кукурузного хлеба. Использованы кукурузные образцы (слева направо): 1 – ‘Кабардинская Белая Зубовидная’; 2 – Попкорн; 3 – ‘Белозерная Тетраплоидная’; 4 – ‘Восковидная Диплоидная’; 5 – ‘Местная Белая Кремнистая’; 6 – ‘Кабардинская 3812’; 7 – ‘Баксанская Сахарная’; 8 – ‘Восковидная Тетраплоидная’; 9 – ‘Тетра-1’; 10 – ‘Ранняя Лакомка’

Fig. 2. Wheat-maize bread samples obtained in the laboratory pan-baking test. Maize accessions involved (left to right): 1 – ‘Kabardinskaya Belaya Zubovidnaya’; 2 – Popcorn; 3 – ‘Belozernaya Tetraploidnaya’; 4 – ‘Voskovidnaya Diploidnaya’; 5 – ‘Mestnaya Belaya Kremnistaya’; 6 – ‘Kabardinskaya 3812’; 7 – ‘Baksanskaya Sakharnaya’; 8 – ‘Voskovidnaya Tetraploidnaya’; 9 – ‘Tetra-1’; 10 – ‘Rannyaya Lakomka’

(см. табл. 9). Максимальную формоустойчивость продемонстрировал хлеб с включением образцов кукурузы, предназначенной для получения амилопектинового крахмала. Наихудшим по этому показателю, наряду с пшеничным хлебом, был хлеб с примесью образцов ‘Местная Белая Кремнистая’ (2n) (крупяного назначения) и ‘Ранняя Лакомка’ (2n) (сахарная кукуруза).

Обобщая результаты хлебопекарной оценки, можно сделать выводы о том, что в целом кукурузный компонент выступает в качестве улучшителя для пшеничной муки за счет укрепления каркаса мякиша, поэтому наиболее эффективен в смесях со слабым пшеничным компонентом; в других случаях он может препятствовать подъему теста, что приводит к снижению объема хлеба.

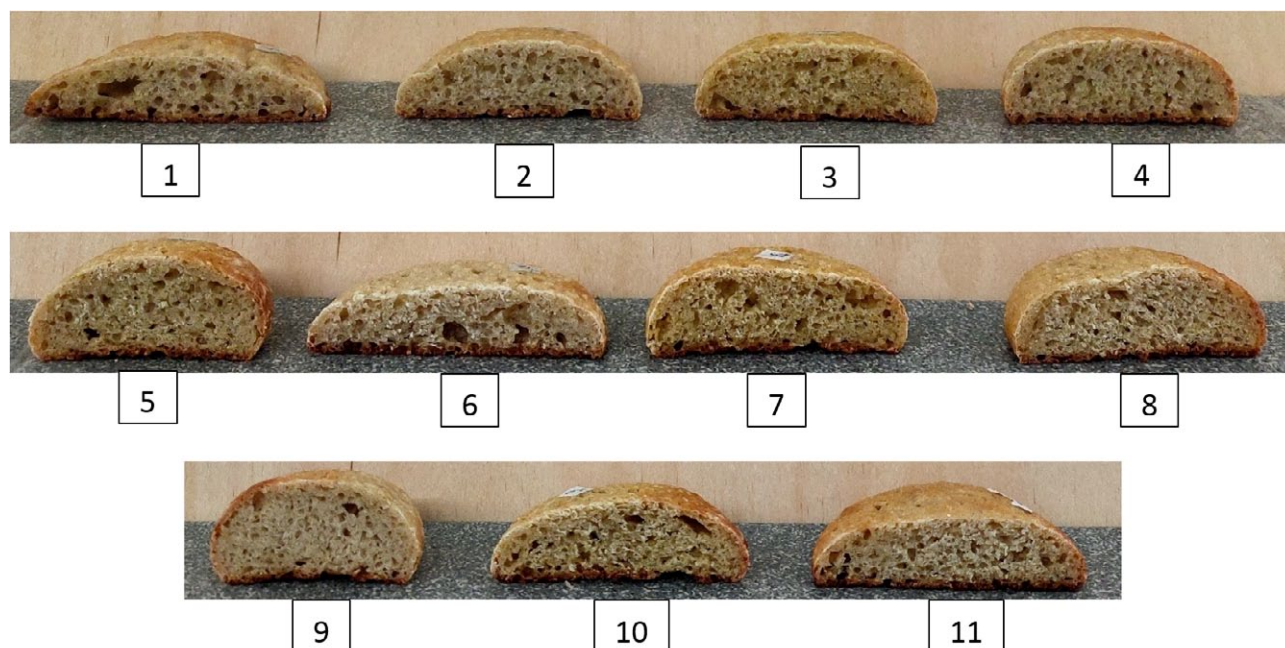


Рис. 3. Лабораторная подовая пробная выпечка пшенично-кукурузного хлеба. Использованы кукурузные образцы (слева направо и сверху вниз): 1 – контроль (пшеничный хлеб); 2 – ‘Кабардинская Белая Зубовидная’; 3 – Попкорн; 4 – ‘Белозерная Тетраплоидная’; 5 – ‘Восковидная Диплоидная’; 6 – ‘Местная Белая Кремнистая’; 7 – ‘Кабардинская 3812’; 8 – ‘Баксанская Сахарная’; 9 – ‘Восковидная Тетраплоидная’; 10 – ‘Тетра-1’; 11 – ‘Ранняя Лакомка’

Fig. 3. Wheat-maize bread samples obtained in the laboratory hearth-baking test. Maize accessions involved (left to right, and top to bottom): 1 – control (wheat bread); 2 – ‘Kabardinskaya Belaya Zubovidnaya’; 3 – Popcorn; 4 – ‘Belozernaya Tetraploidnaya’; 5 – ‘Voskovidnaya Diploidnaya’; 6 – ‘Mestnaya Belaya Kremnistaya’; 7 – ‘Kabardinskaya 3812’; 8 – ‘Baksanskaya Sakharnaya’; 9 – ‘Voskovidnaya Tetraploidnaya’; 10 – ‘Tetra-1’; 11 – ‘Rannyaya Lakomka’

Таблица 9. Результаты лабораторной подовой пробной выпечки пшенично-кукурузного хлеба

Table 9. Results of the laboratory hearth-baking test for wheat-maize bread

Образец	Формоустойчивость h/d	Плотность мякиша, г/мл	Твердость мякиша, г нагрузки	Черствение мякиша за сутки, г нагрузки	Твердость мякиша через сутки, г нагрузки
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	0,34	0,43	3177	2617	5794
‘Белозерная Тетраплоидная’	0,38	0,4	3196	3469	6665
‘Местная Белая Кремнистая’	0,23	0,53	2631	2324	4955
‘Баксанская Сахарная’	0,36	0,49	2344	1797	4141
‘Ранняя Лакомка’	0,28	0,45	1657	2172	3829
‘Восковидная Тетраплоидная’	0,5	0,45	4350	2342	6692
‘Восковидная Диплоидная’	0,42	0,44	2877	2984	5861
‘Кабардинская 3812’	0,33	0,49	2282	3672	5954
‘Тетра-1’	0,32	0,45	3367	3477	6844

Таблица 9. Окончание

Table 9. The end

Образец	Формоустойчивость h/d	Плотность мякиша, г/мл	Твердость мякиша, г нагрузки	Черствение мякиша за сутки, г нагрузки	Твердость мякиша через сутки, г нагрузки
Попкорн	0,33	0,46	2861	2513	5374
Пшеница	0,23	0,48	1520	2031	3551
M ± m	0,34 ± 0,02	0,46 ± 0,01	2751,09 ± 254,09	2672,55 ± 201,63	5423,64 ± 370,05
Me	0,33	0,45	2861	2513	5794
σ	0,08	0,04	803,49	637,60	1170,2
C _v , %	23,35	7,61	29,21	23,86	21,58

Сильное влияние при этом оказывают образцы с высоким содержанием амилопектинового крахмала. Наиболее инертными при выпечке являются образцы сахарной кукурузы.

Заключение

В результате проведенных нами исследований установлены различия между хозяйственными группами кукурузы по твердозерности (гранулометрическому составу), по потенциалу набухания частиц размолотого зерна, по термодинамическим свойствам крахмала, по степени и характеру воздействия на пшеничный компонент при совместной переработке на уровне реологии клейковины, теста и клейстера, а также хлебной выпечки. Показано укрепление белкового комплекса, подавление ферментативных процессов. Это позволяет прогнозировать направление хозяйственного использования новых генотипов и образцов кукурузы. Выявлены различия технологических свойств внутри технологических или хозяйственных групп, что дает возможность вести селекционный отбор по этим признакам. Наиболее выраженные улучшения продуктов совместной с пшеницей переработки установлены для образцов, предназначенных для получения крахмала, причем происходит это как за счет белкового, так и углеводного комплексов. Значительным технологическим потенциалом для улучшения хлебобулочной продукции обладают также образцы мукомольного, крупяного и кормового направления. Наиболее инертны при совместной с пшеницей переработке образцы сахарной кукурузы; они могут быть использованы для получения функциональных продуктов питания, когда не стоит задача технологического улучшения смешанного продукта. Оптимальным образом характеризует смешительную способность кукурузной муки фаринографическая оценка. Однако эту же способность характеризуют и результаты более скоростного и экономичного седиментационного анализа, причем без обращения к смешиванию с рецепиентом (пшеничной мукой). Наиболее полную характеристику термодинамических свойств кукурузного крахмала в продуктах размола зерна дает параллельное использование виско-амилографии и определения числа падения, которые в ряде случаев дополняют друг друга. Значимых отличий по качественным признакам муки, связанных с плоидностью кукурузы, не обнаружено.

References / Литература

- An N.N., Li D., Wang L.J., Wang Y. Microwave irradiation of corn kernels: Effects on structural, thermal, functional and rheological properties of corn flour. *Food Hydrocolloids*. 2023;143:108939. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.108939
- Arendt E.K., Dal Bello F. Functional cereal products for those with gluten intolerance. In: B.R. Hamaker (ed.). *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Technology of Functional Cereal Products*. Sawston: Woodhead Publishing; 2008. p.446-475. DOI: 10.1533/9781845693886.2.446
- Caballero-Rothar N.N., Borrás L., Gerde J.A. Physical and chemical kernel traits affect starch digestibility and glycemic index of cooked maize flours. *Food Chemistry*. 2022;369:130953. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130953
- De Alcântara R.G., de Carvalho R.A., Vanin F.M. Evaluation of wheat flour substitution type (corn, green banana and rice flour) and concentration on local dough properties during bread baking. *Food Chemistry*. 2020;326:126972. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126972
- Ferreira M.P.K., Ribeiro V.A.G, Barros J.H.T., Steel C.J. Strategies to improve the quality of wheat flour in baking: a review. *Brazilian Journal of Food Technology*. 2025;28:e2024046. DOI: 10.1590/1981-6723.04624
- Gu Y., Cheng L., Li C., Li Z., Gu Z., Hong Y. Effects of wheat flour substitution with high-amylose corn flour on the quality of dough and Chinese steamed bread. *Starch*. 2023;75(11-12):2300088. DOI: 10.1002/STAR.202300088
- Guadarrama-Lezama A.Y., Carrillo-Navas H., Vernon-Carter E.J., Alvarez-Ramirez J. Rheological and thermal properties of dough and textural and microstructural features of bread obtained from nixtamalized corn/wheat flour blends. *Journal of Cereal Science*. 2016;69:158-165. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.03.011
- Holding D.R., Larkins B.A. Zein storage proteins. In: A.L. Kriz, B.A. Larkins (eds). *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement*. Berlin: Springer; 2009. p.269-286. DOI: 10.1007/978-3-540-68922-5_19
- Khrapko O.P., Sokol N.V., Sanzharovskaya N.S. Using high-lysine corn flour in the bread-making process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1052:012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1052/1/012014
- Kibkalo I. Effectiveness of and perspectives for the sedimentation analysis method in grain quality evaluation in var-

- ious cereal crops for breeding purposes. *Plants (Basel)*. 2022;11(13):1640. DOI: 10.3390/plants11131640
- Kibkalo I.A., Loskutov I.G., Voitsutskaya N.P., Solovyova M.V., Obukhova N.S., Blinova E.V. Development of methodological approaches to assessing the technological properties of oat grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):6-15. [in Russian] [Кибкало И.А., Лоскутов И.Г., Войцукская Н.П., Соловьева М.В., Обухова Н.С., Блинова Е.В. Разработка методических подходов к оценке технологических свойств зерна овса. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(2):6-15]. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-02
- Kibkalo I.A., Zhuk E.A. Technological properties of the carbohydrate complex of corn grain depending on the variety. *Osnovy i perspektivy organicheskikh tekhnologiy = Fundamentals and Perspectives of Organic Biotechnology*. 2022;(3):15-19. [in Russian] [Кибкало И.А., Жук Е.А. Технологические свойства углеводного комплекса зерна кукурузы в зависимости от сорта. *Основы и перспективы органических биотехнологий*. 2022;(3):15-19].
- Sotchenko V.S. Maize breeding, seed production, and cultivation technology (Seleksiya, semenovodstvo, tekhnologiya vozdeleyvaniya kukuruzy). Pyatigorsk; 2009. [in Russian] (Сотченко В.С. Селекция, семеноводство, технология возделывания кукурузы. Пятигорск; 2009).
- StatSoft Russia: [website]. Available from: <https://soft.space/en/statsoft-statisica> [accessed Jul. 11, 2023].
- Vásquez F., Verdú S., Islas A.R., Barat J.M., Grau R. Effect of low degrees of substitution in wheat flour with sorghum, oat or corn flours on physicochemical properties of composite flours. *Cogent Food and Agriculture*. 2016;2(1):1269979. DOI: 10.1080/23311932.2016.1269979
- Wu Y., Messing J. Proteome balancing of the maize seed for higher nutritional value. *Frontiers in Plant Science*. 2014;5:240. DOI: 10.3389/fpls.2014.00240

Информация об авторах

Илья Анатольевич Кибкало, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, kibk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8870-121X>

Эдуард Балилович Хатефов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, head1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Information about the authors

Ilya A. Kibkalo, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kibk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8870-121X>

Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, head1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.08.2025; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 24.04.2026. The article was submitted on 17.08.2025; approved after reviewing on 13.03.2026; accepted for publication on 24.04.2026.