

Хлебопечение России

2026 | 1-2



Главный редактор журнала

Битус Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и инжиниринга технических систем, Российский биотехнологический университет, Москва, Россия.

Заместитель главного редактора

Омельченко Олег Михайлович – кандидат экономических наук, доцент, директор центра коммерциализации и трансфера технологий, Российский биотехнологический университет, Почётный Пекарь России, Москва, Россия.

Выпускающий редактор

Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

Редакционная коллегия

Алехина Надежда Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Белявская Ирина Георгиевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия.

Березина Наталья Александровна – доктор технических наук, доцент, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия.

Ильина Ольга Александровна – доктор технических наук, профессор, ректор, Международная промышленная академия, Москва, Россия.

Жаркова Ирина Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Жиров Михаил Вениаминович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной автоматики, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Казарцев Дмитрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краснов Андрей Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краус Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Ирекс», вице-президент Российского союза пекарей, председатель правления Союза производителей пищевых ингредиентов, председатель рабочей группы по аграрной и пищевой промышленности при Российско-Германской внешнеторговой палате, Барнаул, Россия.

Магомедов Газибег Омарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Макаров Сергей Васильевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии пищевых продуктов и биотехнологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия.

Налиухин Алексей Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Никитин Игорь Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пищевых технологий и биоинженерии, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия.

Пономарева Елена Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Росляков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевой инженерии, Кубанский государственный технический университет, Краснодар, Россия.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

- Софья Ильинична Антипова, Евгения Сергеевна Землякова
Перспективные способы обогащения и модификации хлебных заквасок 10

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

- Вячеслав Александрович Борисов, Евгений Иванович Битус
Инженерная модель персонализированного питания и стохастическая
многокритериальная оптимизация рационов 24

- Ильнур Ильдарович Гилязов, Андрей Юрьевич Кочнев, Рашат Фаритович
Вагапов, Александр Максимович Суворов
Разработка мехатронной системы управления автономной самоходной
сеялкой рядового посева для повышения качества посевных работ на малых
делянках 32

МАРКЕТИНГ И ФИНАНСЫ

- Олег Михайлович Омельченко
Существование в системе сложившихся ограничений как режим отраслевого
воспроизводства хлебопекарной отрасли 44

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Ильнур Ильдарович Гилязов, Рашат Фаритович Вагапов, Алла Дмитриевна
Харина
Теоретическое и экспериментальное обоснование применения автономной
самоходной сеялки рядового посева в технологиях закладки полевых опытов и
селекционных испытаний 58

CONTENTS

TECHNOLOGY AND PRODUCTION

- Sofya I. Antipova, Evgeniya S. Zemlyakova
Promising methods for enrichment and modification of bread sourdough 10

INFORMATIZATION AND MANAGEMENT

- Vyacheslav A. Borisov, Evgeny I. Bitus
Engineering model of personalized nutrition and stochastic multi-criteria optimization of diets 24

- Ilnur I. Gilyazov, Andrey Yu. Kochnev, Rashat F. Vagapov, Alexander M. Suvorov
Development of a mechatronic control system for an autonomous self-propelled row-sowing seed drill to improve the quality of sowing operations on small plots 32

MARKETING AND FINANCE

- Oleg M. Omelchenko
Existence within a system of established constraints as a mode of industrial reproduction in the baking industry 44

APPLIED RESEARCH

- Ilnur I. Gilyazov, Rashat F. Vagapov, Alla D. Kharina
Theoretical and experimental substantiation of the application of an autonomous self-propelled row seeder in technologies for establishing field experiments and breeding trials 58

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

Перспективные способы обогащения и модификации хлебных заквасок

Софья Ильинична Антипова

Специалист-эксперт

Калининградский государственный технический университет

Калининград, Россия

shuhovtsovas@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Евгения Сергеевна Землякова

Кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой биотехнологии

Специалист-эксперт

Калининградский государственный технический университет

Калининград, Россия

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 27.12.2025

Принята 01.01.2026

Опубликована 28.02.2026

УДК 664.66

DOI

EDN BJMFEG

БАК 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

Хлебобулочные изделия присутствуют в рационах всех групп населения, поэтому является целесообразной разработка обогащенных хлебобулочных изделий для решения современных проблем питания. Анализ литературных источников показал, что использование закваски при производстве хлеба улучшает функционально-технологические, органолептические и пищевые характеристики готовой продукции, в отличие от использования исключительно хлебопекарных дрожжей. Статья посвящена исследованию открытых источников информации для оценки существующих способов обогащения и модификации хлебных заквасок. Наиболее перспективными направлениями являются введение ферментов, стартовых культур.

Ключевые слова

хлебопекарные закваски, дрожжи, ферменты, функциональные продукты, молочнокислые бактерии, ферментация, хлебопечение

Введение

Производство хлеба является одной из древнейших отраслей пищевой промышленности. Первые упоминания о производстве хлеба с использованием дрожжей и печей относятся к Древнему Египту (1300-1500 лет до н.э.) и Китаю (500-300 гг. до н.э.). Однако вполне вероятно, что организованное использование микроорганизмов для ферментации теста возникло ещё раньше (Lahue, 2025).

Производство хлеба представляет собой важнейшую отрасль пищевой промышленности. Хлеб содержит в себе все необходимые макро- и микронутриенты и присутствует в рационе питания всех

групп населения. Однако последние 8 лет, согласно данным Росстата, в России наблюдается тенденция по снижению производства хлеба и хлебобулочных изделий (рис. 1).

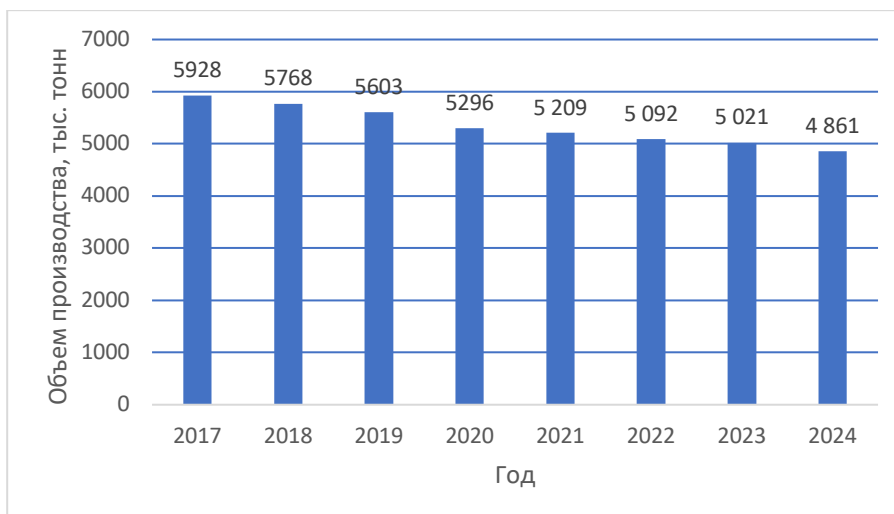


Рисунок 1. Объем производства хлеба и хлебобулочных изделий в России, тыс. тонн

Материалы и методы исследования

Снижение спроса на хлебобулочные изделия обусловлены с одной стороны демографическими изменениями в возрастной структуре населения и вступлением в трудоспособный возраст новых поколений, а с другой тенденцией роста индивидуализации питания, в том числе повышением внимания к здоровым свойствам потребляемых продуктов питания (Акулич, 2022).

При этом наряду с сокращением объемов производства хлеба Российский Союз Пекарей выделяет следующие тенденции на Российском хлебопекарном рынке:

1. увеличение числа малых пекарен и сокращение объема промышленных производств;
2. снижение спроса на традиционные хлебобулочные изделия и увеличение спроса на ремесленные сорта хлеба;
3. рост производства замороженных хлебных полуфабрикатов.

Результаты и обсуждение

Тенденции развития рынка обогащенных мучных изделий свидетельствуют о том, что этот сегмент продовольственного рынка продолжает активно развиваться и совершенствоваться (Хлебникова, 2024). При этом хлебобулочная промышленность – в числе лидеров пищевой отрасли России, а по объемам производства в натуральном выражении она занимает одно из первых мест в мире питания (Акулич, 2022), что говорит о перспективе разработки новых усовершенствованных рецептур хлебобулочных изделий, которые будут удовлетворять спрос современного потребителя, а также решать современные проблемы питания.

Наиболее перспективной является технология производства хлеба на закваске. Закваска представляет собой симбиотическую смесь между дрожжами, в большинстве случаев представленными *Saccharomyces cerevisiae* и гомо- и гетероферментативными молочнокислыми бактериями *Lactobacillus sanfranciscensis*, *Lactobacillus brevis* и *Lactobacillus Plantarum* (Еникеев, 2010). Распространенными видами микроорганизмов в заквасочной флоре являются также *Leuconostoc*, *Weissella*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Enterococcus* и *Streptococcus* (Жаркова, 2023).

Хлеб, произведенный с использованием закваски, имеет ряд преимуществ по сравнению с хлебом, произведенным только с использованием дрожжей:

1. Улучшенные органолептические показатели за счёт выделения бактериями в процессе брожения органических кислот, спиртов, кетонов, альдегидов, эфиров и серосодержащих соединений

(Рейзбих, 2021). Также метаболизм органических кислот является ключевым фактором, определяющим текстуру хлеба (Lu, 2025).

2. Более активное газообразование в процессе брожения с разрыхлением теста и, как следствие, получение более аэрированного хлеба (Соловьев, 2023).

3. Снижение порчи хлебных изделий и развития в них патогенных микроорганизмов за счёт выработки органических кислот, обладающих антимикробными свойствами (Колпакова, 2023; Oleinikova, 2025).

4. Улучшенные реологические свойства теста за счет изменения белковой структуры клейковины в результате протеолиза (Савкина, 2020) и за счет производства глюканов и фруктанов из сахарозы при участии фермента левансахаразы (Умираниева, 2025).

5. Более длительный срок хранения за счет ингибирования перекристаллизации амилопектина и деполимеризации глютена в создаваемой кислой среде (Huang, 2024).

6. Доступные для усвоения организмом человека формы микроэлементов за счет биохимических превращений и снижения уровня антипитательных факторов (Reffai, 2025).

Многие свойства закваски зависят от метаболической активности содержащихся в ней молочнокислых бактерий (Колпакова, 2023; Боровикова, 2024). Соответственно, можно моделировать свойства конечной закваски путем изменения состава молочнокислых бактерий, входящих в её состав.

Эксперименты по кормлению мышей хлебом, приготовленным с использованием закваски, показывают снижение уровня глюкозы в крови и уровня холестерина липопротеинов низкой плотности в сыворотке крови после приема пищи, что подтверждает целесообразность включения ферментации в основные продукты питания в качестве практической диетической стратегии для профилактики сердечно-сосудистых и метаболических заболеваний (Kim, 2025).

Ряд научных разработок направлен на получение нетрадиционных заквасок из растительного сырья. Так, в ходе исследования химического состава и биологической особенности хмеля обыкновенного *Humulus lupulus* было отмечено высокое содержание алкалоидов и дубильных веществ, и рассмотрена возможность использования хмелевых дрожжей для приготовления хмелевой закваски (Кырыкбаева, 2021). Также были исследованы качественные характеристики и физико-химические показатели цельнозернового хлеба на хмелевых заквасках. Результаты исследования показали, что закваска, состоящая из муки пшеничной высшего сорта, сахара, воды питьевой, хмеля (в соотношении 15:4:90:16) оказывала положительное влияние на пористость цельнозернового хлеба, снижала кислотность и влажность мякиша (Быковская, 2023). Использование хмеля в рецептуре в том числе позволило замедлить процесс потери влаги в процессе хранения и не оказывало негативного влияния на другие физико-химические показатели хлеба (Пьяникова, 2022).

Также в целях утилизации вторичного хмелевого сырья была предложена технология по получению полифенол-устойчивых молочнокислых бактерий *Leuconostoc pseudomesenteroides* и *Enterococcus lactis* из высушенных и измельченных ветвей и листьев хмеля и дальнейшее их использование для создания многоштаммовой заквасочной культуры для производства хмелевого хлеба (Viola, 2025).

Еще один способ производства хмелевой закваски был описан в патенте RU 2850684 C1. Он включал в себя приготовление отвара хмельных шишек и далее его смешивание с патокой, которая интенсифицирует брожение закваски, и мукой из светлозерной ржи, обладающей пониженным ингибитором трипсина, и ферментацию в течение 24 часов при температуре 30-35°. Полученная закваска обладала кислотностью 10,5 град и подъемной силой 16,5 минут (Шабалин, 2017).

В ходе усовершенствования рецептуры безглютенового хлеба из овсяной и гречневой муки на рисовой закваске была разработана технология жидкофазного культивирования гречневой закваски с использованием рисового стартера (смесь штаммов молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum*-63, *Lactobacillus brevis*-5, *Lactobacillus brevis*-78 в сочетании со штаммами дрожжей *Candida milleri*, *Saccharomyces cerevisiae*-69 на солодовом сусле). А также установлен режим ведения закваски при температуре 27±1 °C в течение 5,0±0,1 ч при котором конечная кислотность закваски составила 10,0±0,5 град (Игонина, 2025).

В.М. Коняевой (в соавторстве) была предложена рецептура хлеба пшеничного с использованием питательной закваски, полученной с использованием сои. Результаты исследований показали, что закваска на основе соевого молока и ферментированного напитка (*Medusomyces Gisevi*) в количестве 15% и 25% улучшила показатели качества готового изделия, а именно повысила органолептические свойства, увеличила содержание белка, усилила структурно - механические свойства теста, что привело к увеличению водопоглощительной способности, что в свою очередь увеличило срок хранения (Коняева, 2021).

Применение пророщенных бобовых в качестве субстрата для закваски привело к повышению микробного биоразнообразия благодаря питательной ценности и ферментативной активности соевых протеаз. Контролируемая ферментация с использованием штамма молочнокислых бактерий *Pediococcus pentosaceus*, выделенного из ферментированных пророщенных соевых бобов в качестве противогрибкового агента, обогатила продукт биоактивными соединениями, сформировала сбалансированный аминокислотный профиль и увеличила срок хранения без плесени (Shahryari, 2025).

Использование подсырной сыворотки в технологии приготовления хлеба из пшеничной муки показало улучшение органолептических и технологических характеристик, снизив твердость мякиша и изменив его цвет. Хотя, как самостоятельной закваски сыворотки оказалось недостаточно для поддержания процесса ферментации, она изменила микробный состав хлеба в процессе ферментации напрямую за счет введения гомоферментативных молочнокислых бактерий и косвенно за счет увеличения количества простых сахаров, доступных для дрожжей (Ricci, 2026).

Обогащение хлебной закваски комбучей способствовало увеличению антиоксидантной активности и удельного объема хлеба, улучшению структуры мякиша и органолептики и стабильности при хранении. Данные улучшения были обусловлены синергетическим взаимодействием между биоактивными соединениями, присутствующими в комбуче, и длительным процессом ферментации закваски, которые в совокупности улучшили физико-химические и функциональные свойства хлеба (Chen, 2025). Использование комбучи как самостоятельного консорциума для приготовления хлеба также показало положительные результаты. Эксперименты показали, что закваска за счет содержания большого количества уксусной и глюкуроновой кислот способствовала замедлению роста плесени на хлебе. А также данная закваска осталась эффективной после её лиофилизации (Kilmanoglu, 2024).

Сырье, используемое для приготовления заквасок, также зависит от географии. Ученые разных стран в своих исследованиях используют сырьевые источники, характерные для региона проживания.

Так, например, сотрудники кафедры химии Технологического университета Таджикистана исследовали влияние традиционной закваски из гороха-нута на физико-химические свойства хлеба, а также на развитие картофельной болезни хлеба. Было установлено, что с использованием горохово-нудовой закваски уменьшался упек изделий, увеличивалось содержание сухих веществ, повышался срок черствения. Эксперимент по приготовлению хлеба из зараженной картофельной палочкой *Bacillus mesentericus* показал, что использование горохово-нудовой закваски подавляло развитие возбудителя картофельной болезни хлеба (Икрами, 2020). Также исследования показали, что использование нудовой закваски в технологии приготовления безглютенового хлеба снизило вязкость теста и его оседание, одновременно стабилизируя белковые конформации и усилив ближний порядок молекул крахмала. Кроме того, использование нудовой закваски привело к улучшению структуры хлеба, что было обусловлено структурной матрицей, обеспечиваемой белками нута и пищевыми волокнами (Jiang, 2026).

Сотрудники Христианского университета Сатья Вакана (Салатига, Центральная Ява, Индонезия) изучили, как добавление муки из зеленых бананов влияло на свойства хлебобулочных изделий из пшеничной муки. Результаты показали, что введение муки из зеленых бананов в количестве до 10% от общего количества пшеничной муки привело к повышению твердости, эластичности хлеба, что можно было объяснить высоким содержанием резистентного крахмала и пищевых волокон в муке из зеленых бананов (Rahardjo, 2025).

Ученые Нижнедунайского университета Галаца (Румыния) использовали муку киноа и сорго для приготовления безглютенового хлеба. При этом в закваску на основе двух видов безглютеновой муки в разных пропорциях вводили стартовые культуры молочнокислых бактерий. Закваски с использованием

стартовой культуры показали более высокое содержание глицерина и молочной кислоты и более низкое содержание этанола и уксусной кислоты по сравнению с образцами, ферментированными спонтанно. Контролируемая ферментация закваски обеспечила увеличение количества легко извлекаемых фенольных соединений с антиоксидантной активностью. Эмпирические реологические измерения показали, что поведение белков и крахмала в сложной матрице безглютенового теста можно регулировать путем добавления закваски (Lupi, 2025). Закваски на основе амаранта, киноа и риса особенно эффективны при приготовлении безглютенового хлеба. В этом направлении проводились исследования по обогащению хлеба такими соединениями как псиллиум и спирулина. Данные компоненты повысили пищевые свойства хлеба за счет увеличения содержания белка, жирных кислот, незаменимых аминокислот, биологически активных соединений и растворимой пищевой клетчатки (Peñalver, 2024).

Сотрудники департамента биотехнологии Института агрохимии и технологий питания (Испания) использовали для приготовления хлеба закваску с мукой из плодов рожкового дерева, иницированную стартовыми культурами *Saccharomyces cerevisiae*/*Lactiplantibacillus plantarum* и *Kazachstania humilis*/*Lactiplantibacillus plantarum*. Ферментация снизила содержание растворимых сахаров до 42% без ущерба для содержания полифенолов или антиоксидантной способности, а также обе закваски усилили образование эфиров в летучем профиле, при этом обогатив хлеб биоактивными веществами (Olivieri, 2025).

Действует ряд патентов, защищающих технологию приготовления заквасок. Патент RU 2852058 С1 описывает способ приготовления пшенично-томатной закваски типа 1 (естественного, спонтанного брожения) для хлебобулочных изделий. Данная закваска обладает ярким, гармоничным ароматом и высокими биотехнологическими характеристиками (кислотность 7,5-10 град., подъемная сила 15-26 мин.) при сокращении продолжительности этапа выведения закваски до 4-6 суток. А также рецептура закваски решает проблему утилизации томатной сыворотки – побочного продукта производства томатной пасты, которая содержит органические, фенольные и полифенольные соединения, водорастворимые витамины, макро- и микроэлементы (Жаркова, 2025).

Патент RU 2849768 С1 приводит технологию производства сдобных хлебобулочных изделий, предусматривающий приготовление и выбраживание опары с частичной (9%) заменой пшеничной муки соевой окарой. Авторы патента подобрали оптимальные условия замеса (600 об/мин в течение 30-60 с), которые обеспечили образование капиллярно-пористой структуры у клейковинной решетки полуфабрикатов, в которой равномерно распределены крахмальные зерна, дрожжевые клетки, частички окары. За счет дополнительной деструкции окары произошло высвобождение из нее водорастворимых белков, которые обладая эмульгирующими свойствами способствовали равномерному распределению жировой фазы теста. Все это создало благоприятные условия для развития ферментативных процессов при брожении полуфабрикатов и положительно повлияло на их структурно-механические свойства и качество готовых сдобных изделий (Бурматов, 2025).

Метод производства закваски из пророщенного зерна ячменя описан в патенте RU 2823346 С1. Он включает в себя замачивание зерен ячменя в питьевой воде (12-14 часов), проращивание на гидропонном материале (48-50 часов), высушивание пророщенного зерна (при температуре 25-40°C до влажности не более 14%) и размалывание его в муку. Полученная мука из пророщенного ячменя смешивается с водой в соотношении 1:1, далее добавляются дрожжи хлебопекарные прессованные *Saccharomyces cerevisiae* и молочнокислые бактерии *Lactobacillus casei* в соотношении 2:1. Далее закваску выдерживают при температуре 28±2°C в течение 2-5 ч и используют при производстве хлебобулочных изделий. При этом авторы патента отмечают сокращение длительности процесса тестоприготовления, улучшение потребительских достоинств готовых изделий, повышение антиоксидантных свойств: флавоноидов в среднем 3,5 раза; полифенолов – 3,9 раз и общей антиоксидантной активности – 3 раза, увеличение срока сохранения свежести полученного хлеба (Науменко, 2023).

В патенте RU 2702089 С1 отмечена недостаточность использования при производстве хлебобулочных изделий только хлебопекарных дрожжей (без применения закваски), поскольку в данном

случае процесс брожения протекает очень быстро и в тесте не успевают накопиться вкусоароматические вещества. Автор предлагает рецептуру изготовления хлеба повышенной пищевой ценности из цельнозерновой муки полбы, муки льна и люпина с предварительным приготовлением закваски на основе 30-35% рецептурного количества цельнозерновой муки полбы и воды. Данная технология позволяет получить хлеб с низким гликемическим индексом и высоким содержанием пищевых волокон; а также с пониженным содержанием спирторастворимой фракции пшеничной клейковины, обладающей токсическим действием и способствующей формированию аллергии на глютен (Долгих, 2019).

Для эффективного роста закваски необходимо соблюдение ряда условий: использование качественной муки, воды, и поддержание оптимальной температуры (Лопаева, 2023). На качество готового продукта также влияют метод ферментации, включая продолжительность, температуру и технику ферментации (Islam, 2024). Рекомендуется сильнее закислить среду, чтобы поддержать развитие молочнокислой микрофлоры закваски.

Одним из методов закисления среды является непосредственное введение органических кислот. Опыты, в ходе которых часть воды, входящей в рецептуру цельнозернового хлеба, заменили на органические кислоты показали увеличение максимального удельного объема цельнозернового хлеба до 22% при добавлении янтарной кислоты ($3,3 \pm 0,2$ мл/г; pH = 4,5), молочной кислоты ($3,1 \pm 0,2$ мл/г; pH = 4,5) и уксусной кислоты ($3,0 \pm 0,2$ мл/г; pH = 5,5) по сравнению с контрольным образцом ($2,7 \pm 0,2$ мл/г) (Verdonck, 2025).

Отмечено, что использование чистых стартовых культур хлебопекарных микроорганизмов позволяет оптимизировать технологический процесс и улучшить физико-химические и органолептические свойства готового продукта, а также способствовать накоплению полезных продуктов ферментации в хлебе.

Наиболее популярными являются стартовые культуры молочнокислых бактерий, которые можно классифицировать на два типа в зависимости от метаболитов, образующихся в результате ферментации глюкозы: гомоферментативные, которые в основном продуцируют молочную кислоту, и гетероферментативные, которые продуцируют молочную кислоту, уксусную кислоту, CO₂ и этанол (Reffai, 2025).

Существует ряд исследований, посвященных ферментации различных молочнокислых бактерий на закваске хлеба, с точки зрения последующего качества хлеба и его соответствующих питательных свойств. Данные исследований показали, что *Lactobacillus acidophilus* 146 обладают повышенной протеолитической и амилолитической активностью в диапазоне pH 4,7 – 5,5. Это позволило сократить процесс брожения теста, снизить дозировку дрожжей, увеличить выход готовых изделий, а также улучшить пористость, вкус и аромат готовых изделий (Головачева, 2020).

Использование штаммов молочнокислых бактерий *Fructilactobacillus sanfranciscensis* и *Lactiplantibacillus plantarum* при приготовлении хлеба из цельнозерновой пшеничной муки позволило достичь повышения общей титруемой кислотности закваски в 2,4 и 2,5 раза соответственно, при этом pH снижался на 17%. Введение закваски в рецептуру в количестве 10-20% положительно влияло на органолептические характеристики (Seis Subaşı, 2024).

Исследования зарубежных авторов показывают, что использование специфических стартовых культур *Lactiplantibacillus plantarum*, *Levilactobacillus brevis* и *Candida famata* также положительно влияло на поднятие теста и высвобождение этанола. Помимо улучшения технологических свойств, закваски эффективно подавляли рост *Aspergillus niger* и *Penicillium commune* в течение 10 дней, подтверждая их потенциал в качестве натуральных консервантов, способствующих увеличению срока годности готового изделия.

В поисках новых источников безглютенового сырья для приготовления хлеба было проведено исследование процесса ферментации муки гречихи с добавлением изолята белка амаранта при участии стартовых культур *Lactobacillus brevis*, *Weissella confusa*, *Leuconostoc citreum* и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. В ходе ферментации происходил гидролиз крупных белков, что привело к снижению

содержания свободных сульфгидрильных групп и увеличению гидрофобности поверхности. Хлеб имел более высокий удельный объем, твердость и жевательность (Woo, 2025).

Цельнозерновой пшеничный хлеб, приготовленный с использованием консорциума *Companilactobacillus crustorum* и *Wickerhamomyces anomalus* и пекарских дрожжей, помимо улучшенных органолептических свойств содержал большее количество резистентного крахмала (10,9% от общего количества крахмала), чем хлеб, приготовленный только с использованием дрожжей (Verdonck, 2025). А цельнозерновой овсяный хлеб обладал положительными характеристиками при использовании консорциумов *Lactiplantibacillus plantarum*, *Levilactibacillus* и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (Cera, 2024).

Помимо использования стартовых культур молочнокислых микроорганизмов представлены работы по введению новых штаммов дрожжей, например, *Meyerozyma guilliermondii*. Хлеб, произведенный с использованием *Meyerozyma Guilliermondii* в количестве 14% к массе закваски, обладал более высокой антиоксидантной активностью на 30,80% и более низким общим содержанием сахаров, редуцирующих сахаров и фитиновой кислоты на 84,4%, 83,3% и 50,06% соответственно (Jain, 2025). Или по введению пропионовокислых бактерий *Propionibacterium freudenreichii*, которые оказывают синергетическое метаболическое действие на *Fructilactobacillus sanfranciscensis*, такая комбинированная закваска увеличивала содержание органических кислот, pH и количество колоний, что в совокупности оптимизировало реологические свойства теста и улучшило структуру глютеинового белка (Wu, 2025).

Ферменты также играют важную роль в процессе приготовления хлеба и влияют на увеличение объема буханки, текстурные качества и срок хранения (Gadallah, 2025). В закваске есть три источника ферментов: эндогенные ферменты в используемой муке, ферменты, выделяемые микроорганизмами в процессе ферментации, и экзогенные ферменты, которые могут быть добавлены в тесто (Akamine, 2023).

Например, введение ферментных препаратов α -амилазы, протеазы, глюкоамилазы в закваску на основе *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* положительно влияло на физические и органолептические свойства хлебобулочных изделий (Korzhenevskaya, 2023). Введение ферментов α -амилазы, липазы, целлюлазы, трансглутаминазы оказалось целесообразно в случае использования муки с высоким содержанием жиров и пищевых волокон. С использованием ферментов для рецептуры хлеба с конопляной мукой удалось увеличить удельный объем хлеба до 39,1%, уменьшить рассыпчатость до 29,6% и увеличить водопоглощающую способность до 44,5% в сравнении с контролем (Gunko, 2025).

В рецептуре с пшеничной и цельнозерновой мукой эффективным оказалось использование специфичных ферментов – лакказы и гемицеллюлазы, они способствовали снижению твердости, пережевываемости и клейкости (Yahia, 2025). А при использовании ячменной муки было установлено положительное влияние ферментов ксиланазы и β -глюканазы и штаммов *Weissella confusa* и *Kluveromyces marxianus*. Синергетическое действие закваски и экзогенных штаммов улучшило качество выпечки, снизило усвояемость крахмала и предотвратило черствение хлеба (Huang, 2024).

Таким образом, ферментные композиции могут быть целенаправленно подобраны для оптимизации конкретных текстурных характеристик хлеба в зависимости от типа муки и используемого метода ферментации. Для увеличения сроков хранения закваски перспективным решением является сублимированная сушка. Такие молочнокислые бактерии как гетероферментативные *Lactobacillus brevis*, факультативные гетероферментативные *Pediococcus pentosaceus* и некоторые виды *Lactobacillus plantarum* особенно устойчивы к высушиванию и не теряют своих свойств после активации (Kezer, 2022). Так, например, сухая закваска с комбинацией *Pediococcus pentosaceus* и *Saccharomyces cerevisiae* после адаптации увеличила количество летучих соединений в хлебе на 152-218% и удельный объем хлеба на 20%, снизило на 54% твердость мякиша и на 58,6% скорость черствения.

В рамках изучения хранимоспособности сублимированной закваски с использованием стартовой культуры *Lactiplantibacillus plantarum* было обнаружено, что введение инулина способствует поддержанию жизнеспособного количества клеток молочнокислых бактерий и кислотообразующей способности закваски во время хранения. Кроме того, инулин способствовал формированию плотной клейковины в тесте, что положительно влияло на характеристики готовой продукции (Liu, 2024).

Также на увеличение сроков хранения сублимированной закваски влияет введение криопротекторов. Это было показано в исследовании по лиофилизации закваски на основе карамболы. При введении сахарозы в количестве 10% к массе закваски в качестве криопротектора, закваска сохраняла свои свойства. Хлеб, приготовленный на такой закваске, обладал сходными характеристиками с контрольным образцом, при этом в нём наблюдалось увеличение кислотности, галловой кислоты и катехина (Lopes Da Silva, 2025).

Заключение

Таким образом, анализ информации из открытых отечественных и зарубежных источников позволяет сделать ряд выводов. Прежде всего о том, что хлебобулочная промышленность, несмотря на снижение объемов производства, остается одним из ведущих сегментов пищевой отрасли России. Увеличение спроса на ремесленные сорта хлеба и заинтересованность населения в формировании здоровых пищевых привычек свидетельствует об актуальности разработки новых рецептур обогащенных хлебобулочных изделий.

Во-вторых, установлено, что хлеб, произведенный с использованием закваски, обладает наиболее качественными биологическими и физико-химическими характеристиками. Поэтому на сегодня перспективным направлением является разработка модифицированных и обогащенных заквасок, включая использование новых видов растительного сырья. Использование овсяной, гречневой, рисовой, амарантовой муки позволяет расширить ассортимент безглютенового хлеба. Использование гороховой, нутовой муки, а также муки из киноа и сорго является перспективным, в том числе с целью получения хлебобулочных изделий с повышенным содержанием белка. Использование муки из льна и конопли способствует формированию улучшенного жирнокислотного состава изделия.

В это связи отметим также, что современные разработки предлагают утилизацию побочных продуктов пищевой промышленности в технологии приготовления хлебобулочных изделий на закваске, таких как томатная и подсырная сыворотка, соевая окара. Для интенсификации процессов брожения закваски используют метод введения стартовых монокультур или консорциумов (молочнокислых, уксуснокислых бактерий или дрожжей), которые продуцируют кислоты, поддерживающие микрофлору закваски. Этот метод положительно влияет на органолептические характеристики (пористость, вкус и аромат), увеличивает удельный объем изделий, а также подавляет рост плесеней. Использование различных типов ферментов способствует поддержанию процессов брожения за счет гидролиза углеводов и жиров, входящих в состав муки, увеличивая доступность их для микрофлоры закваски. Это также способствует улучшению органолептических показателей, реологических свойств изделий и хранимостпособности хлебобулочных изделий.

Сублимационная сушка является одним из перспективных способов увеличения сроков годности закваски, при этом добавление вспомогательных компонентов инулина или сахарозы положительно влияет на жизнеспособность и сохранность закваски.

Список литературы

1. Акулич А.В., Костюченко М.Н., Балыхин М.Г. Особенности рынка хлебопечения и перспективные направления развития хлебопекарной отрасли Беларуси и России // Хранение и переработка сельхозсырья. 2022. № 3. С. 187-209.
2. Боровикова К.А., Лопаева Н.Л. Закваска: виды и роль // Молодежь и наука. 2024. № 2.
3. Бурматнов А.В., Таранова Е.С., Калмыкова О.В. Патент № 2849768 С1 Российская Федерация, МПК А21D 8/02, А21D 13/02. Способ приготовления сдобного формового хлебобулочного изделия из муки тритикале: заявл. 19.12.2024; опубл. 29.10.2025; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет». Москва, 2025.
4. Быковская Е.И., Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Говядова И.А. Анализ показателей качества цельнозернового хлеба на хмелевых заквасках // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 1 (95). С. 71-78.

5. Головачева, О. В. Характеристика ацидофильной закваски и ее применение // StudNet. 2020. Т. 3. № 11. С. 12.
6. Долгих В.В. Патент № 2702089 С1 Российская Федерация, МПК А21D 13/04. Хлеб повышенной пищевой ценности и способ его изготовления: № 2018147043: заявл. 27.12.2018: опубл. 03.10.2019. Москва, 2018.
7. Еникеев Р.Р., Кашаев А.Г., Зимичев А.В. Применение заквасок в хлебопечении // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2010. № 2-3 (314-315). С. 7-9.
8. Жаркова И.М., Иванчиков Д., Плотникова И.В. Патент № 2852058 С1 Российская Федерация, МПК А21D 8/02, А21D 2/36. Способ приготовления пшенично-томатной хлебопекарной закваски типа 1: заявл. 11.12.2024: опубл. 02.12.2025; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий». Воронеж, 2024.
9. Жаркова И.М., Росляков Ю.Ф., Иванчиков Д.С. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 525-544.
10. Игонина Е.Д., Чернова А.В. Совершенствование рецептуры и технологии безглютенового хлеба на гречневой закваске // Вестник Международной академии холода. 2025. № 1. С. 58-66.
11. Икрами М.Б., Шарипова М.Б. Влияние гороховой закваски на развитие картофельной болезни хлеба // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 2-1 (92). С. 94-97.
12. Колпакова Д.Е., Асякина Л.К. Перспективы использования микробиоты закваски при производстве хлеба // Пищевые здоровьесберегающие технологии: Сборник тезисов II Международного Симпозиума, посвященного 50-летию КемГУ (2-3 ноября 2023 г., Кемерово). Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023. С. 61-63.
13. Коняева В.М., Яковченко Н.В., Федорова Р.А. Использование сои для приготовления питательной закваски в технологии пшеничного хлеба // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 1 (53). С. 156-160.
14. Кырыкбаева Ш.Т., Қалибеқызы Ж. Химический состав, биологические особенности и возможность использования хмеля обыкновенного в качестве закваски для хлебопечения // Вестник университета Шакарима. Серия технические науки. 2021. № 4 (4). С. 43-47.
15. Лопаева Н.Л., Шаравьев П.В. Адаптация, использование и хранение пшеничной закваски // Вестник биотехнологии. 2023. № 1 (34).
16. Науменко Н.В., Фактуллин Р.И., Калинина И.В. Патент № 2823346 С1 Российская Федерация, МПК А21D 8/04, А21D 2/38, А21D 13/02. Способ производства хлеба с использованием пророщенного зерна ячменя: № 2023132011: заявл. 06.12.2023: опубл. 22.07.2024; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет». Челябинск, 2023.
17. Пьяникова Э.А., Ковалева А.Е., Быковская А.Е. Разработка технологии цельнозернового хлеба с применением различных заквасок // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 4. С. 23-30.
18. Рейзбих Е.Ю. Использование заквасок в хлебопечении // Инновационные подходы в современной науке // Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции (23 декабря 2021 г., Прага). Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки» (ИП Вострецов Александр Ильич), 2021. С. 54-60.
19. Росстат: Федеральная служба государственной статистики // rosstat.gov.ru. 2026).
20. Савкина О.А., Кузнецова Л.И., Парахина О.И. Изучение влияния пшеничной закваски «Грантум» на качество и безопасность хлебобулочных изделий // Все о мясе. 2020. № 5S. С. 309-313.
21. Соловьев Н. Р., Лопаева Н.Л. Влияние закваски на текстуру // Молодежь и наука. 2023. № 1.
22. Умиралиева Л.Б., Оспанов А.Б., Исмаилова Э.Т., Филатов И.Д. Аналитический обзор микробиологических аспектов производства биопрепаратов заквасок для хлебопекарной

промышленности на основе высокоактивных культур микроорганизмов // Вестник университета Шакарима. Серия технические науки. 2025. № 3 (19). С. 390-407.

23. Хлебникова В.А. Нетрадиционные компоненты в хлебопечении: проблемы и перспективы // Grand Altai Research & Education. 2024. № 1 (21). С. 43-56.

24. Шабалин Д.В. Патент № 2609238 С1 Российская Федерация, МПК А23L 3/00. Композиция для приготовления белково-растительного продукта: № 2015155241: заявл. 22.12.2015: опубл. 31.01.2017. Москва, 2017.

25. Akamine I.T., Mansoldo F.R.P., Cardoso V.S. Hydrolase activities of sourdough microorganisms // Fermentation. 2023. Vol. 9. № 8. P. 703.

26. Cera S., Tuccillo F., Knaapila A. Role of tailored sourdough fermentation in the flavor of wholegrain-oat bread // Current Research in Food Science. 2024. Vol. 8. Art. 100697.

27. Gadallah M.G.E., Aljalisi A.I. Enzymatic Improvers as Natural Alternatives to Chemical Additives in Bread Making // The Egyptian Science Magazine 2025. Vol. 11. № 1. P. 179.

28. Gunko S, Naumenko O., Hetman I. Determining the influence of enzymes and sourdough of lactic acid bacteria on the quality of wheat-hemp bread // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 5. № 11 (137). pp. 60-70.

29. Huang C., Zhang B., Huang J., Liu Y., Chen C., Omedi J.O., Liang L., Zhou Z., Huang W., Li, N. The effects of single- or mixed-strain fermentation of red bean sourdough, with or without wheat bran, on bread making performance and its potential health benefits in mice model // Foods. 2024. № 13 (17). Art. 2856.

30. Islam Md.A., Islam Sh. Sourdough bread quality: facts and factors // Foods. 2024. Vol. 13. № 13. Art. 2132.

31. Jain K., R. Arora, Bobade H., Kocher G.S. Untapping the potential of *Meyerozyma guilliermondii* for the production of fermented type II sourdough bread having health promoting attributes // Food Bioscience. 2025. Vol. 71. Art. 107186.

32. Jiang R., Lin Z., Shi H. Chickpea sourdough as a functional ingredient in gluten-free bread: Impact on quality attributes // Food Hydrocolloids. 2026. Vol. 172. Art. 112007.

33. Kezer G. Functional perspective on sourdough bread // Turkish Journal of Agricultural and Food Sciences and Technologies. 2022. Vol. 10. № 8. pp. 1410-1414.

34. Kim Y.T., Kwak J.E., Kwon J.Gi. Dietary intervention with sourdough and high-fiber breads enhances metabolic and microbial homeostasis in mice // Food Research International. 2025. Vol. 221. pp. 117433.

35. Lahue C., Smukowski Heil C., Madden A.A., Dunn R.R. History and domestication of *saccharomyces cerevisiae* in bread baking // Frontiers in Genetics. 2020. Vol. 11. № May. pp. 584718.

36. Liu A., Su Sh., Sun Y. Enhancing the highland barley-wheat dough network structure and bread quality using freeze-dried sourdough powder with inulin as a protectant // Food Science and Technology. 2024. Vol. 191. Art. 115599.

37. Lopes Da Silva J., Gallani Silva D.L., Polonio Ju.C. Evaluation of the effect of freeze drying and cryoprotectant addition on a starter culture obtained from star fruit and its application in sourdough bread // Food Bioscience. 2025. Vol. 65. Art. 106132.

38. Lu Sh., An M., Sun R. Organic acid profiles of traditional sourdough microbiota dominates the fermentation effect on whole wheat bread texture // Journal of Cereal Science. 2025. Vol. 124. pp. 104229.

39. Lupu A., Banu Lu., Grigore-Gurgu L. Gluten-free sourdough based on quinoa and sorghum: characterization and applications in breadmaking // Applied Sciences (Switzerland). 2025. Vol. 15. № 10. Art. 5468.

40. Oleinikova Ye, Amangeldi A., Zhaksylyk A. Sourdough Microbiota for Improving Bread Preservation and Safety: Main Directions and New Strategies // Foods. 2025. Vol. 14. № 14. pp. 2443.

41. Olivieri L., Sanmartin G., Prieto J.A. Sourdough bread: An alternative for the valorization of carob flour // Applied Food Research. 2025. Vol. 5. № 2. Art. 101546.

42. Peñalver R., Nieto G. Developing a functional gluten-free sourdough bread by incorporating quinoa, amaranth, rice and spirulina // Food Science and Technology. 2024. Vol. 201. Art. 116162.

43. Rahardjo M., Sihombing M., Carouline B. Sourdough bread innovation with green banana flour seen from its physical and sensory characteristics // *Agromix*. 2025. Vol. 16. № 2. pp. 285-291.
44. Reffai Y.M., Fechtali T. A critical review on the role of lactic acid bacteria in sourdough nutritional quality: mechanisms, potential, and challenges // *Applied Microbiology*. 2025. Vol. 5. № 3. pp. 74.
45. Ricci M., D'aversa S., Bertolino M. Impact of second cheese whey on technological properties, microbial profile, volatile compounds, and consumers' acceptance of sourdough bread made with traditional Italian flours // *Applied Food Research*. 2026. Vol. 6. №N 1. pp. 101566.
46. Shahryari S., Sadeghi A., Tabar Heydar K. Application of sprouted soybean sourdough to improve textural features, mold-free shelf-life, aroma and amino acid profiles of the supplemented wheat bread // *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5. № 2. Art. 101540.
47. Subasi Seis A., Ercan R. Technological characteristics of whole wheat bread: effects of wheat varieties, sourdough treatments and sourdough levels // *European Food Research and Technology*. 2024.
48. Verdonck C., Hecke Z.V., De Bondt Ya. Mechanistic insights into the impact of acetic acid, lactic acid, and succinic acid on the dough rheology, the breadmaking process, and the specific volume of wholemeal sourdough-type bread // *Food Hydrocolloids*. 2025. Vol. 162. Art. 110884.
49. Verdonck C., Lambrechts E., Pradal I. Sourdough starter culture and breadmaking process impact wholemeal bread characteristics associated with starch digestibility // *Current Research in Food Science*. 2025. Vol. 11. pp. 101208.
50. Viola E., Leto L., Piazzese D. Exploring lactic acid bacteria diversity of hop plant by-products to develop a multi-strain starter culture to be used in hop-supplemented sourdough bread // *Food Research International*. 2025. Vol. 219. Art. 117007.
51. Woo S.H., Park J., M. Ju. Sung effect of amaranth protein isolate and fermentation time on buckwheat sourdough bread // *Food Science and Technology*. 2025. Vol. 217. Art. 117325.
52. Yahia D.F., Bourekoua H., Fetouhi A. Impact of sourdoughs, enzymes, and their combinations on gluten-based bread quality // *Processes*. 2025. Vol. 13. № 9. Art. 2796.

Promising methods for enrichment and modification of bread sourdough

Sofya I. Antipova

Expert Specialist
Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad, Russia
shuhovtsovas@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Evgeniya S. Zemlyakova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology
Expert Specialist
Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad, Russia
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 27.12.2025

Accepted 01.01.2026

Published 28.02.2026

UDC 664.66

EDN BJMFEG

VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

Bakery products are presented in the diets of all population groups, making it essential to develop fortified bakery products to solve modern nutritional problems. A literature review has shown that the use of sourdough in bread production improves the functional, technological, organoleptic, and nutritional characteristics of the finished product, compared to the exclusive use of baker's yeast. This article examines open sources to evaluate existing methods for fortifying and modifying bread sourdoughs. The most promising approaches include the addition of enzymes and starter cultures.

Keywords

bread sourdough, yeast, enzymes, functional foods, lactic acid bacteria, fermentation, bread baking.

References

1. Akulich A.V., Kostyuchenko M.N., Balykhin M.G. Features of the Bakery Market and Promising Directions for the Development of the Bakery Industry in Belarus and Russia // *Storage and Processing of Agricultural Products*. 2022. № 3. pp. 187-209.
2. Borovikova K.A., Lopaeva N.L. Yeast: Types and Role // *Youth and Science*. 2024. № 2.
3. Burmatnov A.V., Taranova E.S., Kalmykova O.V. Patent № 2849768 C1 Russian Federation, IPC A21D 8/02, A21D 13/02. Method for preparing a pastry molded bakery product made from triticale flour: application filed on 19.12.2024; published on 29.10.2025; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian Biotechnological University. Moscow, 2025.
4. Bykovskaya E.I., Kovaleva A.E., Pyanikova E.A., Govyadova I.A. Analysis of the Quality Indicators of Wholegrain Bread Made with Hop Ferments // *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023. Vol. 85. No. 1 (95). pp. 71-78.
5. Golovacheva, O. V. Characteristics of acidophilic starter culture and its use // *StudNet*. 2020. Vol. 3. № 11. P. 12.
6. Dolgikh V.V. Patent No. 2702089 C1 Russian Federation, IPC A21D 13/04. High-grade bread values and method of its manufacture: № 2018147043: application on 27.12.2018: published 03.10.2019. Moscow, 2018.
7. Enikeev R.R., Kashayev A.G., Zimichev A.V. Application of starter cultures in baking // *Izvestiya of higher educational institutions // Food technology*. 2010. № 2-3 (314-315). pp. 7-9.
8. Zharkova I.M., Ivanchikov D., Plotnikova I.V. Patent № 2852058 C1 Russian Federation, IPC A21D 8/02, A21D 2/36. Method of preparation of wheat-tomato baking starter type 1: application 11.12.2024: published 02.12.2025; applicant Federal State Budgetary Educational Institution Voronezh State University of Engineering Technologies, an institution of higher education. Voronezh, 2024.
9. Zharkova I.M., Roslyakov Yu.F., Ivanchikov D.S. Starter cultures of spontaneous (natural) fermentation: technology features and role in modern bakery production // *Machinery and Technology of Food Production*. 2023. Vol. 53. № 3. pp. 525-544.
10. Igonina E.D., Chernova A.V. Improving the formulation and technology of gluten-free bread with buckwheat starter culture // *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2025. № 1. pp. 58-66.
11. Ikrami M.B., Sharipova M.B. Influence of pea starter on the development of potato disease of bread // *International Research Journal*. 2020. № 2-1 (92). pp. 94-97.
12. Kolpakova D.E., Asyakina L.K. Prospects for Using Yeast Microbiota in Bread Production // *Food Health-Preserving Technologies: Collection of Abstracts of the II International Symposium Dedicated to the 50th Anniversary of KemSU (November 2-3, 2023, Kemerovo)*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2023. pp. 61-63.
13. Konyaeva V. M., Yakovchenko N.V., Fedorova R.A. The use of soy for the preparation of nutritious starter culture in wheat bread technology // *XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2021. Vol. 10. № 1 (53). pp. 156-160.

14. Kyrykbaeva, Sh.T., Kalibekizy Zh. Chemical composition, biological features and the possibility of using common hops as a starter for baking // Shakarim University Bulletin. Series: Technical Sciences. 2021. № 4 (4). pp. 43-47.
15. Lopaeva N.L., Sharav'ev P.V. Adaptation, Use, and Storage of Wheat Yeast // Bulletin of Biotechnology. 2023. № 1 (34).
16. Naumenko N.V., Fakhtullin R.I., Kalinina I.V. Patent No. 2823346 C1 Russian Federation, IPC A21D 8/04, A21D 2/38, A21D 13/02. Method for producing bread using sprouted barley grain: № 2023132011: applied on 06.12.2023: published on 22.07.2024; applicant: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education South Ural State University. Chelyabinsk, 2023.
17. Pyanikova E.A., Kovaleva A.E., Bykovskaya A.E. Development of technology of whole-grain bread with the use of various leaven // Technologies of Food and Processing Industry of The Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products. 2022. № 4. pp. 23-30.
18. Reizbikh E. Yu. Use of leaven in baking // Innovative approaches in modern science // Materials of the International (correspondence) scientific and practical conference (December 23, 2021, Prague). Neftekamsk: Scientific and Publishing Center «World of Science» (IP Vostretsov Alexander Ilyich), 2021. pp. 54-60.
19. Rosstat: Federal State Statistics Service // rosstat.gov.ru. 2026).
20. Savkina O.A., Kuznetsova L.I., Parakhina O.I. Study of the Influence of Wheat Starter «Grantum» on the Quality and Safety of Bakery Products // All about meat. 2020. № 5S. pp. 309-313.
21. Solovyov N. R., Lopayeva N. L. Influence of the starter on the texture // Youth and Science. 2023. № 1.
22. Umiralieva L.B., Ospanov A.B., Ismailova E.T., Filatov I.D. Analytical review of microbiological aspects of the production of starter cultures for the bakery industry based on highly active microbial cultures // Bulletin of the Shakarim University. Series of Technical Sciences. 2025. № 3 (19). pp. 390-407.
23. Khlebnikova V.A. Non-traditional components in baking: problems and prospects // Grand Altai Research & Education. 2024. № 1 (21). pp. 43-56.
24. Shabalin D.V. Patent № 2609238 C1 Russian Federation, IPC A23L 3/00. Composition for preparing a protein-and-vegetable product: № 2015155241: filed on 22.12.2015: published on 31.01.2017. Moscow, 2017.
25. Akamine I.T., Mansoldo F.R.P., Cardoso V.S. Hydrolase activities of sourdough microorganisms // Fermentation. 2023. Vol. 9. № 8. P. 703.
26. Cera S., Tuccillo F., Knaapila A. Role of tailored sourdough fermentation in the flavor of wholegrain-oat bread // Current Research in Food Science. 2024. Vol. 8. Art. 100697.
27. Gadallah M.G.E., Aljalisi A.I. Enzymatic Improvers as Natural Alternatives to Chemical Additives in BreadMaking // The Egyptian Science Magazine 2025. Vol. 11. № 1. P. 179.
28. Gunko S, Naumenko O., Hetman I. Determining the influence of enzymes and sourdough of lactic acid bacteria on the quality of wheat-hemp bread // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 5. № 11 (137). pp. 60-70.
29. Huang C., Zhang B., Huang J., Liu Y., Chen C., Omedi J.O., Liang L., Zhou Z., Huang W., Li, N. The effects of single- or mixed-strain fermentation of red bean sourdough, with or without wheat bran, on bread making performance and its potential health benefits in mice model // Foods. 2024. № 13 (17). Art. 2856.
30. Islam Md.A., Islam Sh. Sourdough bread quality: facts and factors // Foods. 2024. Vol. 13. № 13. Art. 2132.
31. Jain K., R. Arora, Bobade H., Kocher G.S. Untapping the potential of *Meyerozyma guilliermondii* for the production of fermented type II sourdough bread having health promoting attributes // Food Bioscience. 2025. Vol. 71. Art. 107186.
32. Jiang R., Lin Z., Shi H. Chickpea sourdough as a functional ingredient in gluten-free bread: Impact on quality attributes // Food Hydrocolloids. 2026. Vol. 172. Art. 112007.
33. Kezer G. Functional perspective on sourdough bread // Turkish Journal of Agricultural and Food Sciences and Technologies. 2022. Vol. 10. № 8. pp. 1410-1414.

34. Kim Y.T., Kwak J.E., Kwon J.Gi. Dietary intervention with sourdough and high-fiber breads enhances metabolic and microbial homeostasis in mice // *Food Research International*. 2025. Vol. 221. pp. 117433.
35. Lahue C., Smukowski Heil C., Madden A.A., Dunn R.R. History and domestication of *saccharomyces cerevisiae* in bread baking // *Frontiers in Genetics*. 2020. Vol. 11. № May. pp. 584718.
36. Liu A., Su Sh., Sun Y. Enhancing the highland barley-wheat dough network structure and bread quality using freeze-dried sourdough powder with inulin as a protectant // *Food Science and Technology*. 2024. Vol. 191. Art. 115599.
37. Lopes Da Silva J., Gallani Silva D.L., Polonio Ju.C. Evaluation of the effect of freeze drying and cryoprotectant addition on a starter culture obtained from star fruit and its application in sourdough bread // *Food Bioscience*. 2025. Vol. 65. Art. 106132.
38. Lu Sh., An M., Sun R. Organic acid profiles of traditional sourdough microbiota dominates the fermentation effect on whole wheat bread texture // *Journal of Cereal Science*. 2025. Vol. 124. pp. 104229.
39. Lupu A., Banu Lu., Grigore-Gurgu L. Gluten-free sourdough based on quinoa and sorghum: characterization and applications in breadmaking // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025. Vol. 15. № 10. Art. 5468.
40. Oleinikova Ye, Amangeldi A., Zhaksylyk A. Sourdough Microbiota for Improving Bread Preservation and Safety: Main Directions and New Strategies // *Foods*. 2025. Vol. 14. № 14. pp. 2443.
41. Olivieri L., Sanmartin G., Prieto J.A. Sourdough bread: An alternative for the valorization of carob flour // *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5. № 2. Art. 101546.
42. Peñalver R., Nieto G. Developing a functional gluten-free sourdough bread by incorporating quinoa, amaranth, rice and spirulina // *Food Science and Technology*. 2024. Vol. 201. Art. 116162.
43. Rahardjo M., Sihombing M., Carouline B. Sourdough bread innovation with green banana flour seen from its physical and sensory characteristics // *Agromix*. 2025. Vol. 16. № 2. pp. 285-291.
44. Reffai Y.M., Fechtali T. A critical review on the role of lactic acid bacteria in sourdough nutritional quality: mechanisms, potential, and challenges // *Applied Microbiology*. 2025. Vol. 5. № 3. pp. 74.
45. Ricci M., D'aversa S., Bertolino M. Impact of second cheese whey on technological properties, microbial profile, volatile compounds, and consumers' acceptance of sourdough bread made with traditional Italian flours // *Applied Food Research*. 2026. Vol. 6. №N 1. pp. 101566.
46. Shahryari S., Sadeghi A., Tabar Heydar K. Application of sprouted soybean sourdough to improve textural features, mold-free shelf-life, aroma and amino acid profiles of the supplemented wheat bread // *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5. № 2. Art. 101540.
47. Subasi Seis A., Ercan R. Technological characteristics of whole wheat bread: effects of wheat varieties, sourdough treatments and sourdough levels // *European Food Research and Technology*. 2024.
48. Verdonck C., Hecke Z.V., De Bondt Ya. Mechanistic insights into the impact of acetic acid, lactic acid, and succinic acid on the dough rheology, the breadmaking process, and the specific volume of wholemeal sourdough-type bread // *Food Hydrocolloids*. 2025. Vol. 162. Art. 110884.
49. Verdonck C., Lambrechts E., Pradal I. Sourdough starter culture and breadmaking process impact wholemeal bread characteristics associated with starch digestibility // *Current Research in Food Science*. 2025. Vol. 11. pp. 101208.
50. Viola E., Leto L., Piazzese D. Exploring lactic acid bacteria diversity of hop plant by-products to develop a multi-strain starter culture to be used in hop-supplemented sourdough bread // *Food Research International*. 2025. Vol. 219. Art. 117007.
51. Woo S.H., Park J., M. Ju. Sung effect of amaranth protein isolate and fermentation time on buckwheat sourdough bread // *Food Science and Technology*. 2025. Vol. 217. Art. 117325.
52. Yahia D.F., Bourekoua H., Fetouhi A. Impact of sourdoughs, enzymes, and their combinations on gluten-based bread quality // *Processes*. 2025. Vol. 13. № 9. Art. 2796.

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Инженерная модель персонализированного питания и стохастическая многокритериальная оптимизация рационов

Вячеслав Александрович Борисов

Кандидат технических наук, ведущий эксперт
Международный центр инжиниринга и инноваций
Москва, Россия
v.a.borisov@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Евгений Иванович Битус

Доктор технических наук, профессор
Российский биотехнологический университет
Москва, Россия
evgenbit@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 22.12.2025

Принята 02.01.2026

Опубликована 28.02.2026

УДК 613.2

EDN CVMKZF

БАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

В статье предлагается новый подход к моделированию персонализированного питания, основанный на аналогии с прочностью композитов. Составлена двухкомпонентная модель «матрица–наполнитель», где генетически обусловленный метаболический потенциал человека выступает в роли матрицы, а нутриенты в роли наполнителя. Показатель эффективности метаболической системы («интегральный показатель здоровья») определяется как сумма вкладов базового уровня и модифицирующего воздействия нутриентов с учётом их доли, эффективности и индивидуальных генетических коэффициентов. Для решения задачи многокритериального выбора оптимального рациона в условиях неопределённости применён метод SMAA-MOORA, позволяющий ранжировать альтернативы по вероятности достижения наилучшего результата. На основе анализа индексов приемлемости рангов определены оптимальные рецептуры макаронных изделий с добавлением банановой муки и гидроколлоидов.

Ключевые слова

персонализированное питание, композитные материалы, матрица–наполнитель, интегральный показатель здоровья, SMAA-MOORA, принятие решений, планирование эксперимента.

Введение

Современная нутрициология сталкивается с фундаментальной проблемой, вызванной необходимостью перехода от усреднённых рекомендаций к персонализированным схемам питания, учитывающим индивидуальные генетические и физиологические особенности человека (Гибни, 2016;

Фергюссон, 2016). Существующие подходы, основанные на балансе калорий и макронутриентов, дают лишь приблизительную оценку и не позволяют прогнозировать индивидуальный метаболический ответ.

Математические модели первого приближения для индивидуального рациона питания можно разделить на три уровня: 1) модели 1-го уровня (балансовые), основанные на применении закона сохранения энергии для контроля изменения массы тела: $M = f(\text{пол, возраст, вес, рост, активность})$, где M – масса тела; 2) модели 2-го уровня (макронутриентные), основанные на учёте распределения энергии по белкам, жирам и углеводам (БЖУ) с учётом специфического действия для контроля примерного состава тела (мышцы/жир): $\Delta m = f(\text{пол, возраст, вес, рост, активность, пропорции БЖУ, тип активности})$; 3) модели 3-го уровня (молекулярные), подобные методам, применяемым в физикохимии полимерных материалов, определяющие постпрандиальный ответ (глюкоза, аминокислоты) по данным о генетике (SNP) и аминокислотном профиле с учётом факторов из моделей 1-3.

В данной работе на основе теории надёжности сложных систем (последовательное соединение элементов) разработана модель 4-го уровня (системная), полученная исходя из стохастической многокритериальной надёжности для определения вероятности сохранения здоровья (интегральная надёжность) с учётом факторов из моделей 1-3, дополненных микробиомом, циркадными ритмами и вероятностными распределениями.

Материалы и методы исследования

В технике аналогичная задача решается при проектировании композитных материалов, где итоговая прочность определяется свойствами матрицы и наполнителя, а также характером их взаимодействия. В частности, в технологии композитной пряжи прочность описывается как сумма вкладов прочности волокон матрицы и прочности склеек, усиленных наполнителем (Борисов, 2007; Борисов, 2009; Борисов, 2011). Эта аналогия может быть перенесена на метаболические системы, где «матрицей» выступает генетически обусловленный метаболический потенциал, а «наполнителем» – поступающие с пищей нутриенты.

Дополнительная сложность заключается в том, что параметры метаболической системы известны лишь приближённо и подчиняются вероятностным распределениям. В этой ситуации классические детерминированные методы оптимизации неприменимы. Необходим аппарат стохастического многокритериального принятия решений, позволяющий учитывать неопределённость как в оценках критериев, так и в предпочтениях лица, принимающего решение (Лахдельма, 2001; Тервонен, 2008).

В настоящей работе предложена инженерная модель персонализированного питания на основе аналогии с прочностью композитной пряжи и на основе метода SMAA-MOORA определены оптимальные (в вероятностном смысле) рецептуры для различных целевых групп.

Результаты и обсуждение

В работах (Борисов, 2007; Борисов, 2009; Борисов, 2011) получены уравнения для определения прочности композитной пряжи. Переноса по аналогии одно из уравнений на метаболическую систему, составим следующую инженерную модель:

$$H(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n (D_i(t), E_i, G_i, K_{H(i)}(t)), \quad (1)$$

где H – интегральный показатель здоровья (аналог прочности пряжи); H_0 – базовый уровень здоровья, определяемый генетическим фоном (аналог прочности матрицы без наполнителя); t – время; D_i – доля i -го нутриента в рационе (аналог объёмной доли связующего); E_i – эффективность i -го нутриента (его потенциальная польза); G_i – генетический коэффициент соответствия «матрицы» (аналог качества «склейки»), зависящий от SNP (Single Nucleotide Polymorphisms) человека. Например, для фолиевой кислоты коэффициент G_i будет низким у людей с вариантом гена MTHFR. Коэффициент может принимать значения от 0 (генетическая нечувствительность) до 1 (максимальная чувствительность); K_n – коэффициент накопления эффекта.

Генетические коэффициенты G_i являются стохастическими величинами, распределение которых может быть определено на основе данных популяционных исследований или индивидуального генотипирования.

Значение коэффициента накопления эффекта определим по аналогии с уравнением [5], учитывающим комбинацию быстрых и медленных эффектов, считая, что регулярное потребление нутриента меняет метаболический «ландшафт» организма:

$$K_H(t) = K_0 + \gamma \ln\left(1 + \frac{t}{\tau}\right), \quad (2)$$

где $K_H(t)$ – чувствительность организма к нутриенту после t дней регулярного приёма; K_0 – начальная чувствительность (может быть равна 1); γ – скорость адаптации (индивидуальный параметр человека); τ – характерное время адаптации (например, для изменения микробиома – недели).

Представляя долю i -го нутриента в рационе через концентрацию и индивидуальную функцию всасывания с учётом уравнений (1) и (2), получаем окончательную инженерную модель персонализированного питания:

$$H(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n \left[E_i, G_i \left(1 + \gamma_i \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_i}\right) \right) \int_0^t C_i(\tau) k_{B(i)}(\tau) d\tau \right], \quad (3)$$

где $C_i(t)$ – концентрация i -го нутриента в рационе в момент t ; $k_{B(i)}(t)$ – индивидуальная функция всасывания.

Для реализации задачи стохастического моделирования преобразуем детерминированную модель (3) в стохастическую:

$$H_j(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n \left[E_i, G_i(\sigma) \cdot \left(1 + \gamma_i(\sigma) \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_i(\sigma)}\right) \right) \int_0^t C_i(\tau) k_{B(i)}(\tau) d\tau \right], \quad (4)$$

где $H_j(t)$ – прогнозируемое значение для j -го критерия.

Неопределённость моделируется за счёт придания каждому параметру не точечного значения, а распределения вероятностей: $G_i(\sigma)$ – нормальное распределение $N(\mu(G_i), \sigma(G_i))$, где $\mu(G_i)$ – точечная оценка генетического коэффициента (например, из SNP-чипа), а $\sigma(G_i)$ – значение уверенности в этой оценке (чем больше $\sigma(G_i)$, тем выше неопределённость); $k_{B(i)}(t)$ – логнормальное распределение, так как скорость всасывания не может быть отрицательной и часто имеет «длинный хвост»; $C_i(t)$ – моделируется как случайный процесс или как случайная величина с нормальным распределением вокруг целевого значения (из-за неточности соблюдения диеты); γ_i и τ_i – задаются распределениями на основе данных популяционных исследований.

Альтернативы (A_i) – различные варианты рецептов или рационов. В настоящем исследовании рассматриваются пять рецептов макаронных изделий.

Критерии (g_j) – целевые показатели, по которым оценивается эффективность. Критерии могут быть как выгодными (benefit), так и затратными (cost). Выгодные (чем больше, тем лучше): g_1 – прочность на разрыв (г); g_2 – эластичность (мм); g_3 – содержание резистентного крахмала (%). Затратные (чем меньше, тем лучше): g_4 – гликемический индекс; g_5 – потери при варке (%).

Веса критериев (w_j): относительная важность каждого критерия. В SMAA веса не задаются жёстко, а рассматриваются как случайные величины с равномерным распределением, что позволяет учесть разные предпочтения (Лахдельма, 2001; Тервонен, 2008; Брауэрс, 2006; Аргул, 2017).

Запускается симуляция (например, 10 000 итераций). На каждой итерации ξ выполняется следующее:

1. Генерация сценария: для каждой альтернативы A_i и каждого критерия g_j разыгрываются случайные значения параметров G_i , $k_{B(i)}$, γ_i , τ_i из их заданных (принятых) распределений.

2. Генерация весов: разыгрывается случайный вектор весов критериев $w = (w_1, \dots, w_5)$ из равномерного распределения в пространстве весов.

3. Вычисление критериев: подстановка сгенерированных значений в уравнение (4) позволяет получить численные значения всех g_j для данной альтернативы.

4. Ранжирование методом MOORA (Reference Point Approach): нормировка полученных значений g_j ; определение «точки отсчёта» R – лучших значений по каждому критерию среди всех альтернатив на данной итерации; для каждой альтернативы A_i вычисление расстояния до точки отсчёта по методу минимакса:

$$\min_i \max_j (|r_i - g_{ij}^*|) \quad (5)$$

Альтернатива с наименьшим расстоянием получает ранг 1 на этой итерации.

5. Запись результатов: сохранение ранга каждой альтернативы.

После завершения всех итераций вычисляются три ключевых показателя: индексы приемлемости ранга (b_i^r) – доля симуляций (вероятность), в которых альтернатива A_i занимала ранг $г$; центральный весовой вектор (w_i^c) – средние значения весов критериев, при которых альтернатива оказывается наилучшей; фактор уверенности (p_i^c) – показатель, характеризующий точность выделения лучшей альтернативы.

Для демонстрации разработанной методологии рассмотрим задачу выбора оптимальной рецептуры макаронных изделий (лапши) с точки зрения их влияния на метаболические показатели человека.

Альтернативы (A_i) – исследуются пять рецептур макарон: A_1 – контрольный образец (100% пшеничная мука высшего сорта); A_2 – A_1 с добавлением 30% муки из зелёного банана (источник резистентного крахмала); A_3 – A_1 с добавлением 30% банановой муки и 1% ксантановой камеди; A_4 – A_1 с добавлением 30% банановой муки и 1% гуаровой камеди; A_5 – A_1 с добавлением 30% банановой муки и 1% карбоксиметилцеллюлозы.

Критерии (g_j): g_1 – прочность на разрыв (максимизация), г; g_2 – эластичность (максимизация), мм; g_3 – содержание резистентного крахмала (максимизация), %; g_4 – гликемический индекс (минимизация); g_5 – потери при варке (минимизация), %].

Исходные данные для расчёта критериев получены на основе экспериментальных исследований (Tangthanantorn 023; O,1986; Чжу, 2023) и представлены в таблице 1. Данные адаптированы с учётом пересчёта в единицы, принятые в настоящем исследовании.

Таблица 1. Значения критериев для альтернативных рецептур макарон

Альтернатива	g_1 (прочность), г	g_2 (эластичность), мм	g_3 (RS), %	g_4 (GI)	g_5 (потери), %
A_1	$53,23 \pm 2,1$	$44,65 \pm 1,8$	$5,56 \pm 0,14$	$77,05 \pm 0,26$	$4,34 \pm 0,05$
A_2	$28,76 \pm 1,5$	$18,32 \pm 1,2$	$18,03 \pm 0,40$	$65,95 \pm 0,34$	$4,12 \pm 0,06$
A_3	$32,15 \pm 1,8$	$21,45 \pm 1,4$	$18,87 \pm 0,35$	$64,82 \pm 0,31$	$3,93 \pm 0,04$
A_4	$29,88 \pm 1,6$	$19,76 \pm 1,3$	$18,51 \pm 0,38$	$65,21 \pm 0,33$	$4,02 \pm 0,05$
A_5	$27,94 \pm 1,4$	$17,89 \pm 1,1$	$18,29 \pm 0,42$	$65,58 \pm 0,36$	$4,23 \pm 0,07$

Результаты применения метода SMAA-MOORA к пяти альтернативам представлены в таблице 2. Для каждой альтернативы приведены индексы приемлемости первого (b_i^1), второго (b_i^2) и третьего (b_i^3) рангов, фактор уверенности (p_i^c) и центральный весовой вектор.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Наилучшей альтернативой является A_3 (банановая мука 30% + ксантановая камедь 1%) с индексом приемлемости первого ранга 0,452. Это означает, что в 45,2% всех возможных сценариев (с учётом неопределённости генетических коэффициентов и весов критериев) данная рецептура

оказывается наилучшей. Фактор уверенности (0,823) указывает на высокую степень достоверности этого вывода.

Таблица 2. Результаты SMAA-MOORA анализа для пяти альтернатив

Альтернатива	b_i^1	b_i^2	b_i^3	p_i^c	Центральные веса (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)
A ₁	0,012	0,018	0,024	0,087	(0,18; 0,17; 0,16; 0,25; 0,24)
A ₂	0,186	0,245	0,212	0,412	(0,22; 0,21; 0,28; 0,15; 0,14)
A ₃	0,452	0,287	0,156	0,823	(0,18; 0,19; 0,31; 0,17; 0,15)
A ₄	0,203	0,268	0,234	0,467	(0,20; 0,20; 0,29; 0,16; 0,15)
A ₅	0,147	0,182	0,374	0,318	(0,21; 0,20; 0,27; 0,16; 0,16)

2. Второй по эффективности является A₄ (банановая мука 30% + гуаровая камедь 1%) с $b^1 = 0,203$, что существенно ниже лидера.

3. Третьей следует A₂ (банановая мука 30% без гидроколлоидов) с $b^1 = 0,186$.

4. Наихудшие результаты показала контрольная альтернатива A₁ ($b^1 = 0,012$) и A₅ ($b^1 = 0,147$), что подтверждает эффективность добавления банановой муки и гидроколлоидов для улучшения нутриентного профиля макаронных изделий.

Полученные результаты позволяют сформулировать ряд практически значимых рекомендаций.

Добавление банановой муки увеличивает содержание резистентного крахмала с 5,56% до 18,03–18,87% и снижает гликемический индекс с 77,05 до 64,82–65,95, что позволяет классифицировать такие изделия как продукты со средним гликемическим индексом. Наибольший эффект достигается при комбинации банановой муки с ксантановой камедью (рецептура A₃), которая обеспечивает наилучшие показатели прочности, эластичности и минимальные потери при варке.

Выявлена высокая чувствительность результатов к типу используемого гидроколлоида: ксантановая камедь показала наилучшие результаты по комплексу критериев. Гуаровая камедь и карбоксиметилцеллюлоза также улучшают показатели по сравнению с контрольным образцом, однако уступают ксантановой камеди по вероятности достижения наилучшего результата.

Предложенный метод SMAA-MOORA позволяет не только выбрать наилучшую альтернативу, но и количественно оценить связанные с этим выбором риски. Индекс приемлемости первого ранга является мерой уверенности в том, что данная альтернатива действительно окажется наилучшей в реальных условиях. Для альтернативы A₃ фактор уверенности составляет 0,823, что соответствует высокой степени надёжности прогноза.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Предложена и апробирована инженерная модель персонализированного питания, основанная на аналогии с прочностью композитных материалов. Модель «матрица–наполнитель» (уравнение 1) позволяет количественно связать интегральный показатель здоровья с генетическими особенностями индивида и составом рациона.

2. Разработана процедура стохастического многокритериального выбора оптимального рациона на основе метода SMAA-MOORA. Метод позволяет учитывать неопределённость как в оценках метаболического ответа, так и в предпочтениях лица, принимающего решение.

3. В результате анализа пяти альтернативных рецептов макаронных изделий установлено, что наилучшей (в вероятностном смысле) является рецептура с добавлением 30% банановой муки и 1% ксантановой камеди (A₃) с индексом приемлемости первого ранга 0,452 и фактором уверенности 0,823.

4. Показано, что добавление банановой муки увеличивает содержание резистентного крахмала с 5,56% до 18,03–18,87% и снижает гликемический индекс с 77,05 до 64,82–65,95, что позволяет классифицировать такие изделия как продукты со средним гликемическим индексом.

5. Выявлена высокая чувствительность результатов к типу используемого гидроколлоида: ксантановая камедь показала наилучшие результаты по комплексу критериев, включая прочность, эластичность и снижение потерь при варке.

6. Показано, что контрольная рецептура (100% пшеничная мука) является наименее предпочтительной с точки зрения нутриентного профиля, что подтверждает целесообразность использования функциональных ингредиентов.

7. Дальнейшее развитие метода может быть направлено на расширение факторного пространства моделей (введение микронутриентов, учёт физической активности); калибровку генетических коэффициентов на основе реальных клинических данных; создание программного комплекса для автоматизированного подбора персонализированных рационов.

Список литературы

1. Акул Э., Кизилкайя Айдоган Э., Озджан М., Турксой Х.Г. Оптимизация параметров вихревой прядильной машины Murata с помощью подхода SMAA-MOORA // *Industria Textila*. 2017. Т. 68(5). С. 323-331.
2. Борисов В.А. Анализ процесса формирования прочности бескрученной пряжи из химических волокон и их смесей // *Химические волокна*. 2009. № 3. С. 43-45.
3. Борисов В.А. Технология производства некрученной пряжи из химических волокон и их смесей / *Техника и технология*. 2011. № 3 (44). С. 29-34.
4. Борисов В.А., Черников А.Н. Прогнозирование разрывной нагрузки вискозной пряжи с адгезионным скреплением волокон // *Химические волокна*. 2007. № 4. С. 15-16.
5. Брауэрс В. К., Завадскас Э. К. Метод MOORA и его применение в сфере приватизации в странах с переходной экономикой // *Управление и кибернетика*. 2006. Т. 35 (2). С. 445–469.
6. Гибни М. Дж., Уолш М. К., Гусенс Дж. Персонализированное питание: путь к улучшению здоровья населения // *Good Nutrition Perspectives*. 2016. С. 78-95.
7. Лахдельма Р., Салминен П. SMAA-2: Стохастический многокритериальный анализ приемлемости для группового принятия решений // *Operations Research*. 2001. Т. 49 (3). С. 444-454.
8. О Н.Х., Сейб П.А., Финни К.Ф., Померанц Я. Лапша V. Определение оптимального водопоглощения муки для приготовления восточной лапши // *Химия зерновых культур*. 1986. Т. 63. № 2. С. 93-96.
9. Тангтананторн Дж., Виченчот С., Сирифонгпайсал П. Разработка продуктов из лапши с высоким содержанием резистентного крахмала из банановой муки // *Food Science and Technology*. 2023. Т. 42. С. 1-8.
10. Тервонен Т., Фигейра Ж. Р. Обзор методов стохастического многокритериального анализа приемлемости // *Журнал многокритериального анализа решений*. 2008. Т. 15. С. 1-14.
11. Фергюсон Л.Р. Руководство и позиция Международного общества нутригенетики/нутригеномики по персонализированному питанию // *Journal of Nutrigenetics and Nutrigenomics*. 2016. Т. 9. С. 12-27.
12. Чжу С., Чжан С., Бай Л. и др. Влияние *Bacillus vallismortis* на физико-химические свойства, структурные характеристики и функциональные возможности теста и лапши // *Foods*. 2023. Т. 12. № 22. С. 4146.

Engineering model of personalized nutrition and stochastic multi-criteria optimization of diets

Vyacheslav A. Borisov

Candidate of Technical Sciences, Leading Expert
International Center for Engineering and Innovation
Moscow, Russia
v.a.borisov@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Evgeny I. Bitus

Doctor of Technical Sciences, Professor
Russian University of Biotechnology
Moscow, Russia
evgenbit@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 22.12.2025

Accepted 02.01.2026

Published 28.02.2026

UDC 613.2

EDN CVMKZF

VAK 4.3.3. Food systems (technical sciences)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

The article proposes a new approach to modeling personalized nutrition based on the analogy with the strength of composites. A two-component “matrix-filler” model is composed, where the genetically determined metabolic potential of a person acts as a matrix, and nutrients act as a filler. The efficiency indicator of the metabolic system (“integral indicator of health”) is determined as the sum of the contributions of the basic level and the modifying effect of nutrients, taking into account their share, efficiency, and individual genetic coefficients. To solve the problem of multi-criteria selection of the optimal diet under conditions of uncertainty, the SMAA-MOORA method was used, which allows ranking alternatives by the probability of achieving the best result. Based on the analysis of the acceptability index ranks, the optimal recipes for pasta products with the addition of banana flour and hydrocolloids were determined.

Keywords

personalized nutrition, composite materials, matrix-filler, integral health indicator, SMAA-MOORA, decision-making, experiment planning.

References

1. Akgul E., Kizilkaya Aydogan E., Ozdjan M., Turksoy H.G. Optimization of the parameters of the murata vortex spinning machine using the SMAA-MOORA approach // *Industria Textila*. 2017. Vol. 68(5). pp. 323-331.
2. Borisov V.A. Analysis of the process of forming the strength of non-twisted yarns made from chemical fibers and their mixtures // *Chemical Fibers*. 2017. 2009. № 3. pp. 43-45.
3. Borisov V.A. Technology of production of non-twisted yarn from chemical fibers and their mixtures / *Technique and technology*. 2011. № 3 (44). pp. 29-34.
4. Borisov V.A., Chernikov A.N. Prediction of breaking load of viscose yarn with adhesive bonding of fibers // *Chemical Fibers*. 2007. № 4. pp. 15-16.

5. Brauers V. K., Zavadskas E. K. The MOORA method and its application in the field of privatization in countries with economies in transition // *Management and Cybernetics*. 2006. Vol. 35 (2). pp. 445-469.
6. Gibney M. J., Walsh M. K., Gusens J. Personalized Nutrition: A Path to Improving Public Health // *Good Nutrition Perspectives*. 2016. pp. 78-95.
7. Lakhdelma R., Salminen P. SMAA-2: Stochastic multi-criteria acceptability analysis for group decision-making // *Operations Research*. 2001. № 49 (3). pp. 444-454.
8. About N.H., Seib P.A., Finney K.F., Pomerants Y. Noodles V. Determination of the optimum water absorption of flour for making oriental noodles // *Cereal Chemistry*. 1986. Vol. 63. № 2. pp. 93-96.
9. Tangtanantorn J., Vichenchot S., Siriwongpaisal P. Development of noodles with high resistant starch content from banana flour // *Food Science and Technology*. 2023. Vol. 42. pp. 1-8.
10. Tervonen T., Figueira J. R. A review of stochastic multi-criteria acceptability analysis methods // *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2008. Vol. 15. pp. 1-14.
11. Ferguson L.R. Guidelines and position of the international society of nutrigenetics/nutrigenomics on personalized nutrition // *Journal of Nutrigenetics and Nutrigenomics*. 2016. Vol. 9. pp. 12-27.
12. Zhu S., Zhang S., Bai L. The effect of *Bacillus vallismortis* on the physical and chemical properties, structural characteristics, and functional capabilities of dough and noodles // *Foods*. 2023. Vol. 12. № 22. pp. 41-46.

Разработка мехатронной системы управления автономной самоходной сеялкой рядового посева для повышения качества посевных работ на малых участках

Ильнур Ильдарович Гилязов

Специалист-эксперт
Казанский государственный аграрный университет
Казань, Россия
gilyazoff.i@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Андрей Юрьевич Кочнев

Специалист-эксперт
Казанский государственный аграрный университет
Казань, Россия
kochniev2014@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Рашат Фаритович Вагапов

Специалист-эксперт
Казанский государственный аграрный университет
Казань, Россия
Vrf498@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Александр Максимович Суворов

Специалист-эксперт
Казанский государственный аграрный университет
Казань, Россия
aleks.suvorov.1991@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 09.12.2025

Принята 19.01.2026

Опубликована 28.02.2026

УДК 631.331

EDN DHZIKY

БАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

Качество рядового посева на малых участках в селекции и первичном семеноводстве лимитируется тем, что серийная посевная техника проектируется под крупноконтурные поля и сохраняет механический привод высевальных аппаратов от опорно-приводного колеса. Буксование колеса, пассивное копирование рельефа и короткие гоны с частыми разворотами приводят к систематическому отклонению нормы высева, повышенному рассеву глубины заделки и нарушению ширины стыковых междурядий, тогда как агротехнические допуски для участков жёстче, чем для производственных посевов. В работе обоснована структура мехатронной системы управления автономной самоходной сеялкой, в которой дозирование привязано к истинной путевой скорости, измеряемой спутниковым приёмником RTK совместно с одометрией, глубина заделки стабилизируется активным контуром «датчик

– линейный привод», а равномерность распределения корректируется по сигналу оптических датчиков потока семян. На авторской расчётной модели с имитационным моделированием по участкам гона выполнено сопоставление качественных показателей базовой механической и предлагаемой мехатронной схемы. Замена колёсного привода сервоприводом, ведомым по истинной скорости, снижает среднее отклонение нормы высева с величины порядка 11% до значений в пределах $\pm 0,8\%$ и устраняет зависимость отклонения от буксования, которое в базовом варианте достигает 16%. Среднеквадратическое отклонение глубины заделки уменьшается с 9,1 до 3,4 мм, что переводит показатель в границы допуска ± 5 мм, а курсовое отклонение снижается до 2,7 см по среднеквадратическому значению. Полученные соотношения показывают, что прирост качества посева на делянках достигается перестройкой измерительно-управляющего контура уже применяемых рабочих органов, а не усложнением конструкции высевающей системы.

Ключевые слова

мехатронная система управления, автономная самоходная сеялка, рядовой посев, малые делянки, норма высева, глубина заделки семян, спутниковая навигация RTK, имитационное моделирование, качество посева.

Введение

Малые делянки селекционных питомников, сортоиспытательных участков и звеньев первичного семеноводства предъявляют к рядовому посеву более жёсткие требования, чем производственные поля: при длине гона в несколько десятков метров и ширине захвата менее метра любое отклонение нормы высева, глубины заделки или ширины междурядья искажает условия развития делянки и снижает достоверность сравнения сортов. Серийные зерновые и пропашные сеялки рассчитаны на крупноконтурные поля и сохраняют механический привод высевающих аппаратов от опорно-приводного колеса, при котором подача семян жёстко связана с вращением колеса, а не с фактическим перемещением машины. А.Н. Крючин (Крючин, 2016) при обосновании самоходной пневматической мини-сеялки для трав показал, что именно на малых нормах высева и коротких гонах погрешности дозирования проявляются наиболее остро, а классические схемы контроля высева, разработанные для пропашных сеялок (Балашов, 2016), переносятся на делянки лишь частично.

Противоречие, определяющее задачу, состоит в несовпадении точности серийных рабочих органов с делянными допусками. Привод дозатора от опорного колеса вносит погрешность, пропорциональную буксованию: на свежеработанной рыхлой почве делянок проскальзывание достигает 12-16%, и на эту же величину занижается фактический высев. Пассивное копирование рельефа сошниковой группой через поводок и пружину оставляет разброс глубины заделки, выходящий за агротехнический допуск, а короткие гоны с частыми разворотами увеличивают долю стыковых перекрытий и огрехов. Системы контроля высева, описанные в работах по модернизации пропашных сеялок (Завражнов, 2021), фиксируют факт прохождения семян, но не замыкают обратную связь по норме; при этом, как отмечают Е.В. Шумейко и соавторы (Шумейко, 2021) применительно к тенденциям развития посевной техники, переход от регистрации к управлению остаётся незавершённым именно в сегменте малогабаритных машин.

Развитие автономных самоходных платформ создаёт предпосылки для иного решения, при котором делянка обрабатывается без оператора, а качество посева задаётся не навыком механизатора, а характеристиками измерительно-управляющего контура. Обзор автономных систем вождения в сельском хозяйстве, выполненный А.И. Купреенко с коллегами (Купреенко, 2020), показывает, что спутниковая навигация с поправками RTK обеспечивает повторяемость прохода на уровне нескольких сантиметров, достаточном для делянного посева. Вместе с тем в специализированной литературе отсутствует консенсус по архитектуре управления для малой самоходной сеялки: одна линия работ ограничивается дискретным мониторингом высева и сигнализацией о пропусках, другая настаивает на полном замыкании контуров дозирования, глубины и курса. Вопрос о том, какой из подходов оправдан

для делянных условий и какой выигрыш в качестве он даёт, остаётся дискуссионным и требует количественной верификации.

Делянные условия усиливают каждую из перечисленных погрешностей. Короткий гон оставляет приводному колесу мало пути для усреднения буксования, поэтому случайная составляющая проскальзывания не сглаживается, как на длинном производственном проходе, а напрямую переносится в норму высева конкретной делянки. Частые развороты на поворотных полосах увеличивают долю участков с переменной скоростью, где механический дозатор работает в неуставившемся режиме. Малая ширина захвата делает заметным вклад каждого стыкового междурядья: при шести рядах одно смещённое междурядье искажает шестую часть делянки. Совокупно это означает, что требования к стабильности дозирования, глубины и курса на делянках оказываются выше, чем для производственного посева, притом, что серийная техника обеспечивает обратное соотношение запасов.

Цель работы – обосновать структуру мехатронной системы управления автономной самоходной сеялкой рядового посева и оценить её влияние на нормируемые показатели качества посева на малых делянках при сопоставлении с базовой механической схемой. Предметом рассмотрения выступает измерительно-управляющий контур сеялки: связь дозирования с истинной путевой скоростью, активная стабилизация глубины заделки и коррекция равномерности распределения семян, а также их совокупное влияние на отклонение нормы высева, рассев глубины и курсовую устойчивость.

Материалы и методы исследования

Исследование построено на авторской расчётной модели мехатронной сеялки и имитационном моделировании процесса посева по участкам гона. Расчётная схема разделяет величины двух типов. Нормативные и справочные значения – агротехнические допуски рядового посева (предельное отклонение нормы высева, неравномерность высева отдельными аппаратами, повреждение семян, отклонение глубины заделки) и достижимая точность спутникового позиционирования – приняты по действующим агротехническим требованиям и по паспортным характеристикам серийных систем параллельного вождения и автопилотов с поправками RTK, для которых абсолютная точность удержания траектории составляет 2,0-2,5 см. Параметры модельного объекта – ширина захвата, число рядков, междурядье, диаметр опорно-приводного колеса, рабочая скорость, тип привода дозатора и состав датчиков – заданы как непротиворечивый расчётный пример и помечены как модельные.

Сопоставлялись две схемы. Базовая схема воспроизводит серийное решение с механическим приводом высевающего аппарата от опорного колеса и пассивным копированием рельефа; в ней подача семян связана с вращением колеса и потому чувствительна к буксованию. Предлагаемая мехатронная схема замыкает три контура: дозирования – сервопривод высевающего вала, ведомый по истинной путевой скорости от приёмника RTK и одометрии (принцип синхронизации высева со скоростью агрегата, рассмотренный А.С. Гончаром и А.П. Гордиевским (Гончар, 2018) на базе автоматизированной системы управления); глубины – активная связка «датчик глубины – линейный электропривод сошниковой секции», развивающая идею автоматического управления глубиной посева, лабораторно проверенную С.Н. Кокошиным и А.С. Кизуровым (Кокошин, 2022); равномерности – коррекция подачи по сигналу оптических датчиков потока семян, совместимая с микропроцессорной системой управления высевом, предложенной в работе М.Н. Московского, М.А. Литвинова и А.А. Адамяна (Московский, 2019).

Имитационное моделирование выполнено методом статистических испытаний: гон длиной 60 м разбивался на участки по 0,5 м, для каждого участка разыгрывались случайные реализации буксования приводного колеса (среднее 10%, среднеквадратическое отклонение 3,5%), пульсации механического дозатора, остаточной погрешности сервопривода и обратной связи по потоку семян. По полученным реализациям рассчитывались среднее отклонение нормы высева, продольная и междурядная неравномерность, среднеквадратическое отклонение глубины заделки и курсовое отклонение, после чего показатели сопоставлялись с агротехническими допусками. Отдельно строилась оценка чувствительности отклонения нормы высева к буксованию и сводный баланс погрешностей измерительно-управляющего контура.

Связь дозирования со скоростью задавалась через угловую скорость высевающего вала, пропорциональную путевой скорости и обратно пропорциональную заданному шагу подачи. В базовой схеме источником сигнала скорости служило опорно-приводное колесо, и его буксование уменьшало фактическую угловую скорость вала, занижая высев; в мехатронной схеме угловая скорость вала формировалась по истинной скорости платформы, измеренной спутниковым приёмником и одометрией, вследствие чего буксование переставало влиять на подачу. Глубина заделки в базовом варианте описывалась откликом пассивной сошниковой секции на микрорельеф с запаздыванием поводково-пружинного копира, а в мехатронном – откликом активного контура с обратной связью по датчику глубины и линейным приводом. Курсовое отклонение в базовом варианте моделировалось как ошибка удержания траектории без автоматической коррекции, в мехатронном – как остаточная ошибка спутникового автопилота с поправками RTK. Число статистических испытаний на каждый показатель принималось достаточным для стабилизации оценок среднего и среднеквадратического отклонения, а исходные распределения буксования и пульсаций согласовывались с характерными для рыхлой свежеработанной почвы значениями.

Результаты и обсуждение

Систематизация решений в области управления посевом обнаруживает устойчивое разделение по глубине автоматизации. Первый уровень – регистрация и сигнализация: системы контроля высева фиксируют прохождение семян и формируют сигнал о пропусках, но не воздействуют на норму. Анализ систем автоматизированного контроля посевных комплексов, выполненный К.А. Житковым, Д.Ю. Колодичем и Е.В. Демчуком (Житков, 2023), относит к этому уровню большинство серийных решений и отмечает, что обратная связь по норме высева в них, как правило, отсутствует. Развитие беспроводного обмена данными в контуре контроля высева (Зазуля, 2023) и внедрение элементов цифровизации на пропашных сеялках (Завражнов, 2023) расширяют информационную составляющую, но сохраняют разомкнутость по исполнению: данные собираются и передаются, тогда как коррекция подачи остаётся за оператором.

Второй уровень – управление, при котором сигнал датчика замыкается на исполнительный механизм. Н.Е. Шипунов и Е.В. Демчук (Шипунов, 2024) относят к перспективному направлению цифровые системы контроля работы посевных машин, способные не только регистрировать, но и корректировать параметры высева. Параллельно формируется линия автономных платформ: роботизированные посевные комплексы (Дмитриев, 2024), алгоритмы самонастраивающихся нейросетей для автономного управления техникой, рассмотренные И.Р. Алимовой (Алимова, 2025), и опытные образцы агроботов для посева (Фирзаули, 2025) переносят функции оператора на бортовую систему. Для малой делянной сеялки эти линии соединяются: автономность снимает влияние навыка механизатора, а замкнутые контуры дозирования, глубины и курса задают качество посева непосредственно. Дальнейший анализ построен на количественном сопоставлении базовой и мехатронной схем по нормируемым показателям без привлечения дополнительных литературных данных.

Принятый порядок сопоставления отделяет постановку расчётной задачи от интерпретации собственных результатов. Сначала фиксируются параметры модельного объекта и нормативные допуски, затем приводятся результаты имитационного моделирования по каждому показателю, после чего раздельно рассматриваются чувствительность нормы высева к буксованию и баланс погрешностей контура. Такая последовательность относит каждый числовой результат либо к заданным условиям расчёта, либо к собственному выводу модели и устраняет смешение исходных предпосылок с полученными соотношениями.

Параметры модельной автономной самоходной сеялки, принятые в расчёте, сведены в табл. 1. Объект представляет собой лёгкую самоходную платформу делянного класса с шестью рядками при междурядье 0,15 м и электрическим приводом высевающего вала, что соответствует масштабу селекционных и семеноводческих посевов.

Таблица 1. Параметры модельной автономной самоходной сеялки, принятые в расчёте

Параметр	Значение	Примечание
Число рядков	6	делянный класс
Междурядье	0,15 м	рядовой посев
Ширина захвата	0,90 м	расчётная
Диаметр опорно-приводного колеса	0,50 м	база буксования
Рабочая скорость (номинальная)	1,8 м/с (6,5 км/ч)	пониженная для деленок
Привод высевающего вала	вентильный сервопривод	ведомый по скорости
Стабилизация глубины	датчик + линейный электропривод	активный контур
Контроль распределения	оптические датчики потока семян	обратная связь
Навигация	приёмник RTK + одометрия	удержание траектории
Управляющее устройство	бортовой микроконтроллер	три замкнутых контура

Источник: составлено автором по модельным данным.

Принятая компоновка не выходит за пределы решений, уже освоенных в малогабаритной технике, и потому позволяет рассматривать прирост качества как следствие перестройки управления, а не замены рабочих органов. Существенно, что опорно-приводное колесо в мехатронной схеме сохраняется конструктивно, но исключается из тракта дозирования: оно остаётся элементом ходовой части, тогда как команда на высевающий вал формируется по истинной путевой скорости.

Нормируемые показатели качества рядового посева и их предельные значения приведены в табл. 2. Допуски приняты по агротехническим требованиям и служат границей, относительно которой оценивается соответствие обеих схем.

Таблица 2. Нормируемые показатели качества рядового посева и агротехнические допуски

Показатель	Допуск	Единица
Отклонение фактической нормы высева от заданной	не более ± 3	%
Неравномерность высева отдельными аппаратами (зерновые)	не более 3	%
Неравномерность высева отдельными аппаратами (бобовые)	не более 4	%
Повреждение семян высевающими аппаратами	не более 1	%
Отклонение глубины заделки от заданной	± 5	мм
Отклонение ширины стыкового междурядья	± 2 (делянные условия)	см

Источник: по агротехническим требованиям к рядовому посеву.

Сводное сопоставление качественных показателей базовой механической и мехатронной схем по результатам имитационного моделирования представлено в табл. 3. Для каждого показателя приведены модельное значение обеих схем, агротехнический допуск и вывод о соответствии.

Таблица 3. Качественные показатели посева при базовой механической и мехатронной системах управления

Показатель	Базовая схема	Мехатронная схема	Допуск	Соответствие
Среднее отклонение нормы высева, %	-11,4	-0,2	± 3	база – нет, мехатр. – да
Продольная неравномерность распределения, % (CV)	10,5	4,7	–	снижение в 2,2 раза

Неравномерность высева по рядкам, % (CV)	2,8	1,2	≤ 3	обе в допуске
Среднеквадратическое отклонение глубины, мм	9,1	3,4	± 5	база – нет, мехатр. – да
Курсовое отклонение (СКО), см	6,4	2,3	± 2 (стык)	приближение к допуску
Повреждение семян, %	1,6	0,7	≤ 1	база – нет, мехатр. – да
Коэффициент устойчивости общего высева, %	89,5	95,3	–	рост на 5,8 п.п.

Источник: расчёты автора по модельным данным.

Наибольший разрыв между схемами обнаруживается по отклонению нормы высева. В базовом варианте среднее занижение высева составляет 11,4%, что более чем втрое превышает допустимые $\pm 3\%$; причина – привязка дозатора к вращению опорного колеса, теряющего часть пути на буксование. В мехатронной схеме дозирование следует за истинной путевой скоростью, и отклонение удерживается в пределах $\pm 0,8\%$, определяемых только точностью отработки сервопривода. Таким образом, переход от колёсного привода к сервоприводу, ведомому по скорости, переводит ключевой показатель из зоны грубого нарушения допуска в зону соответствия, не затрагивая конструкцию самого высевающего аппарата.

Продольная неравномерность распределения снижается с 10,5 до 4,7%, то есть приблизительно в 2,2 раза. Снижение обусловлено двумя факторами: устранением пульсаций, вносимых проскальзыванием колёсного привода, и коррекцией подачи по сигналу оптических датчиков потока семян. Междурядная неравномерность в обеих схемах остаётся в границах допуска (2,8% против 1,2%), однако в базовом варианте она близка к предельным 3% и при неблагоприятном сочетании влажности почвы и буксования способна выйти за допуск, тогда как в мехатронной схеме сохраняется кратный запас. Сокращение повреждения семян с 1,6 до 0,7% связано с переходом на плавно регулируемый электропривод вала, исключая рывковые нагрузки механической передачи.

Агрономическое значение разрыва по норме высева раскрывается через густоту стояния. Систематическое занижение высева на 11% при базовой схеме означает пропорциональное уменьшение числа высеянных семян на единицу длины рядка, а на делянке селекционного питомника это искажает сравнимость вариантов: разница в густоте, вызванная техникой посева, накладывается на сортовые различия и снижает достоверность оценки. Удержание отклонения в пределах $\pm 0,8\%$ в мехатронной схеме сохраняет заданную густоту независимо от состояния почвы конкретной делянки, что выравнивает фон для всех вариантов опыта. Снижение продольной неравномерности усиливает этот результат: при коэффициенте вариации 4,7% распределение семян по длине рядка приближается к равномерному, тогда как 10,5% базового варианта соответствуют чередованию загущённых и изреженных участков, по-разному влияющих на развитие растений даже при правильной средней норме.

Стабилизация глубины заделки даёт сопоставимый по значимости результат. Пассивное копирование рельефа оставляет среднеквадратическое отклонение глубины на уровне 9,1 мм, при котором около трети заделок выходит за допуск ± 5 мм; на коротких делянных гонах с неровным микрорельефом этот эффект усиливается. Активный контур «датчик глубины – линейный электропривод» снижает отклонение до 3,4 мм, и распределение глубины укладывается в допуск с запасом, что согласуется с лабораторными данными об автоматическом управлении глубиной посева. Курсовое отклонение по среднеквадратическому значению уменьшается с 6,4 до 2,3 см: удержание траектории приёмником RTK совместно с одометрией приближает ширину стыкового междурядья к делянному допуску ± 2 см, тогда как при ручном вождении на коротких гонах перекрытия и огрехи неизбежны.

Чувствительность отклонения нормы высева к буксованию приводного колеса показана в табл. 4. Сопоставление демонстрирует принципиальное различие схем: в базовом варианте отклонение прямо следует за буксованием, в мехатронном – остаётся вблизи нуля во всём рассмотренном диапазоне.

Таблица 4. Чувствительность отклонения нормы высева к буксованию приводного колеса

Буксование колеса, %	Базовая схема, %	Мехатронная схема, %	Превышение допуска $\pm 3\%$
4	-4,0	+0,06	база – да, мехатр. – нет
8	-8,0	0,00	база – да, мехатр. – нет
12	-12,0	-0,02	база – да, мехатр. – нет
16	-16,0	-0,07	база – да, мехатр. – нет

Источник: расчёты автора по модельным данным.

Линейная зависимость отклонения от буксования в базовой схеме означает, что её соответствие допуску невозможно обеспечить настройкой передаточного отношения: коэффициент пришлось бы пересчитывать под конкретную влажность и плотность почвы каждой делянки, что в делянных условиях нереализуемо. Мехатронная схема снимает зависимость по построению, поскольку измеряет фактическое перемещение, а не оборот колеса; остаточное отклонение в сотые доли процента определяется шумом сервоконтура и не связано с состоянием почвы. Это смещает источник погрешности нормы высева из агрофизической области, плохо поддающейся контролю, в область метрологии привода, где он нормируется паспортно.

Практическая невозможность калибровки базовой схемы под делянку усугубляется тем, что буксование меняется не только между делянками, но и в пределах одного гона. Влажность верхнего слоя, плотность после предпосевной обработки и наличие растительных остатков различаются по длине прохода, и проскальзывание приводного колеса следует за этими изменениями. Передаточное отношение механического привода фиксировано, поэтому компенсировать переменное буксование оно не способно даже при идеальной начальной настройке; отклонение нормы высева в этом случае не постоянно, а дрейфует вслед за состоянием почвы. Мехатронная схема воспроизводит заданную норму при любом мгновенном значении буксования, поскольку команда на вал формируется по фактически пройденному пути, а не по обороту колеса, и потому остаётся в допуске на всём диапазоне почвенных условий делянки.

Структура погрешностей измерительно-управляющего контура мехатронной схемы приведена в табл. 5. Раздельная оценка составляющих позволяет определить, какие звенья вносят основной вклад в остаточную погрешность качества посева.

Таблица 5. Баланс погрешностей измерительно-управляющего контура мехатронной сеялки

Источник погрешности	Значение	Влияние
Спутниковое позиционирование RTK	$\pm 2,5$ см	курс, междурядье
Одометрия после фильтрации	$\pm 1,1$ см	курс, путевая скорость
Сервопривод дозатора	$\pm 0,8$ %	норма высева
Датчик глубины и линейный привод	$\pm 1,9$ мм	глубина заделки
Оптический датчик потока семян	$\pm 1,3$ %	равномерность распределения
Курсовое отклонение, суммарно (СКО)	2,7 см	стыковое междурядье

Источник: составлено автором; точность RTK – по паспортным данным систем параллельного вождения.

Сводный баланс показывает, что в курсовом контуре доминирует спутниковая составляющая: одометрия после фильтрации вносит примерно вдвое меньшую погрешность, и суммарное среднеквадратическое отклонение по курсу составляет 2,7 см. Дальнейшее улучшение удержания траектории на делянках достигается не усложнением бортовой обработки, а повышением класса спутниковой коррекции, тогда как в контурах нормы высева и глубины запас точности уже избыточен относительно агротехнических допусков. Перераспределение требований между звеньями оказывается практически значимым: ресурсы контроля целесообразно концентрировать на курсовом контуре, наименее обеспеченном запасом, а не на дозировании, где погрешность на порядок ниже допуска.

Отдельного внимания заслуживает поведение контуров на разворотах и в начале каждого делянного гона, где скорость платформы меняется. Привязка дозирования к измеренной скорости масштабирует подачу при разгоне и торможении, тогда как механический привод в этих режимах даёт переходный заброс или провал нормы, приходящийся как раз на краевые зоны делянки. Активный контур глубины с быстрым линейным приводом отрабатывает микрорельеф поворотной полосы без накопленного запаздывания пассивного копира, а спутниковое удержание траектории обеспечивает повторяемость захода на смежный проход. В совокупности это снижает долю краевых огрехов, которая на коротких гонах вносит непропорционально большой вклад в общую неоднородность делянки.

Совокупность полученных соотношений складывается в пользу трактовки, обозначенной во введении: для малой самоходной сеялки выигрыш в качестве посева достигается не наращиванием числа рабочих органов, а перестройкой измерительно-управляющего контура уже применяемых высевающих аппаратов и сошниковых секций. Замыкание трёх контуров – дозирования по истинной скорости, глубины по активному приводу и курса по спутниковой коррекции – переводит три из четырёх нормируемых показателей из зоны нарушения допуска в зону соответствия, а четвёртый, курсовой, приближает к делянной норме. Дискретный мониторинг высева, распространённый в серийных решениях, такого перевода не обеспечивает, поскольку оставляет исполнительную часть разомкнутой.

Архитектурно полученный результат означает, что мехатронная сеялка делянного класса не требует переусложнённой бортовой системы. Три независимых контура опираются на уже измеряемые величины – путевую скорость, глубину хода сошника и положение относительно линии прохода – и не вводят дополнительных рабочих органов сверх серийного высевающего аппарата и сошниковой секции. Вычислительная нагрузка распределяется между контурами неравномерно: дозирование и стабилизация глубины реализуются простыми законами регулирования с большим запасом по точности, тогда как основной ресурс приходится на обработку спутникового сигнала и удержание траектории. Соответственно усложнение оправдано лишь в курсовом контуре, а удешевление остальных звеньев не ухудшает итоговых показателей качества, что важно для серийной реализуемости делянной машины.

Заключение

Обоснованная структура мехатронной системы управления автономной самоходной сеялкой опирается на привязку дозирования к истинной путевой скорости, активную стабилизацию глубины заделки и спутниковое удержание траектории. Эти три контура воздействуют на разные источники делянной погрешности, оставаясь в пределах конструкции серийных рабочих органов, и потому реализуемы как переоснащение, а не как новая машина.

Решающим для качества посева на делянках оказывается исключение опорно-приводного колеса из тракта дозирования. Пока подача семян связана с оборотом колеса, отклонение нормы высева повторяет буксование и на рыхлой почве делянок достигает порядка 16%, тогда как привязка к измеренной скорости удерживает его в пределах долей процента и делает независимым от состояния почвы. Этот сдвиг переносит источник погрешности из плохо контролируемой агрофизической области в область метрологии привода, где точность нормируется заранее.

Активная стабилизация глубины и спутниковое вождение дополняют картину количественно соизмеримым образом. Снижение среднеквадратического отклонения глубины с величины свыше 9 мм до значения около 3,4 мм вводит показатель в допуск ± 5 мм, а удержание траектории на уровне порядка 2,7 см по среднеквадратическому отклонению приближает ширину стыкового междурядья к делянной

норме. Раздельный баланс погрешностей при этом указывает, что наименее обеспечен запасом именно курсовой контур, где доминирует спутниковая составляющая, тогда как в дозировании и стабилизации глубины запас точности относительно допусков избыточен.

Из совокупности результатов следует содержательный вывод о предмете: прирост качества рядового посева на малых участках достигается перенастройкой измерительно-управляющего контура уже применяемых высевальных и сошниковых органов, а не усложнением высевальной системы. Управление, замкнутое по норме, глубине и курсу, переводит большинство нормируемых показателей в границы агротехнических допусков; дискретная регистрация посева без обратной связи по исполнению такого перевода не даёт. Для практики участкового посева это означает, что приоритет при оснащении автономной самоходной сеялки принадлежит курсовому контуру с высокоточной спутниковой коррекцией, поскольку именно он определяет остаточный запас по качеству, а контуры дозирования и глубины уже обеспечивают кратный резерв относительно нормативных границ.

Список литературы

5. Алимова И.Р. Алгоритмы самонастраивающихся нейросетей для автономного управления сельскохозяйственной техникой // Молодежь и инновации. Чебоксары, 2025. С. 257-259.
6. Балашов А.В., Пустоваров Н.Ю. Контроль посева семян на пропашных сеялках // Интеллектуальные технологии и техника в АПК. Мичуринск, 2016. С. 217-225.
7. Гончар А.С., Гордиевский А.П. Синхронизация высевального аппарата со скоростью агрегата, с применением АСУ // Приоритетные направления развития энергетики в АПК. 2018. С. 278-282.
8. Дмитриев Д.А., Курасов В.С. Посевной роботизированный комплекс // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Краснодар, 2024. С. 336-338.
9. Житков К.А., Колодич Д.Ю., Демчук Е.В. Анализ систем автоматизированного контроля посевных комплексов // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития. Омск, 2023. С. 73-79.
10. Завражнов А.И., Балашов А.В., Пустоваров Н.Ю., Крищенко А.В. Модернизация системы контроля посева семян на пропашных сеялках // Сельский механизатор. 2021. № 7. С. 8-9.
11. Завражнов А.И., Балашов А.В., Крищенко А.В. Использование элементов цифровизации на пропашных сеялках для контроля и управления посевом семян // Садоводы-за здоровьесбережение нации! Мичуринск, 2023. С. 138-143.
12. Зазуля А.Н., Стрыгин С.П., Пустоваров Н.Ю., Крищенко А.В., Гаврилин А.В. Использование беспроводного обмена данными в системе контроля посева // Сельский механизатор. 2023. № 1-2. С. 12-13.
13. Кокошин С.Н., Кизуров А.С. Результаты лабораторных исследований автоматической системы управления глубиной посева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 3 (95). С. 134-140.
14. Крючин А.Н. Повышение качества посева семян трав самоходной пневматической мини-сеялкой применением дисково-штифтового высевального аппарата: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза, 2016.
15. Купреенко А.И., Исаев Х.М.О., Михайличенко С.М. Автономные системы вождения в сельском хозяйстве // Инновации и технологический прорыв в АПК. 2020. С. 249-254.
16. Московский М.Н., Литвинов М.А., Адамян А.А. Разработка микропроцессорной системы управления посевом семян // Инженерный вестник Дона. 2019. № 7 (58). С. 16.
17. Фирзаули А.Р., Плотникова И.О. Агроробот для посева // XIII Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации». Кемерово, 2025. С. 165-167.
18. Шипунов Н.Е., Демчук Е.В. Цифровые системы контроля работы посевных машин // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития. Омск, 2024. С. 283-289.

19. Шумейко Е.В., Бардола А.С., Сердалин М.К., Демчук Е.В. Тенденция развития конструкций посевной техники // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях. Омск, 2021. С. 198-204.

Development of a mechatronic control system for an autonomous self-propelled row-sowing seed drill to improve the quality of sowing operations on small plots

Ilnur I. Gilyazov

Specialist-expert
Kazan State Agrarian University
Kazan, Russia
gilyazoff.i@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Andrey Yu. Kochnev

Specialist-expert
Kazan State Agrarian University
Kazan, Russia
kochniev2014@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Rashat F. Vagapov

Specialist-expert
Kazan State Agrarian University
Kazan, Russia
Vrf498@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Alexander M. Suvorov

Specialist-expert
Kazan State Agrarian University
Kazan, Russia
aleks.suvorov.1991@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 09.12.2025

Accepted 19.01.2026

Published 28.02.2026

UDC 631.331

EDN DHZIKY

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

The quality of row sowing on small plots in plant breeding and primary seed production is limited by the fact that commercial sowing machinery is designed for large fields and retains a mechanical drive of the metering units from the ground wheel. Wheel slip, passive terrain copying and short runs with frequent turns lead to a systematic deviation of the seeding rate, an increased scatter of placement depth and a violation of the joint

inter-row width, while the agrotechnical tolerances for plots are stricter than for production fields. The study substantiates the structure of a mechatronic control system for an autonomous self-propelled seed drill, in which metering is tied to the true ground speed measured by an RTK satellite receiver together with odometry, the placement depth is stabilised by an active «sensor – linear actuator» loop, and the distribution uniformity is corrected by the signal of optical seed-flow sensors. Using the author's calculation model with segment-wise simulation of a run, the quality indicators of the baseline mechanical and the proposed mechatronic schemes are compared. Replacing the wheel drive with a servo driven by the true speed reduces the mean seeding-rate deviation from about 11% to within $\pm 0.8\%$ and removes its dependence on slip, which in the baseline reaches 16%. The root-mean-square deviation of placement depth decreases from 9.1 to 3.4 mm, bringing the indicator within the ± 5 mm tolerance, while the cross-track deviation drops to 2.7 cm by the root-mean-square value. The obtained relations show that the gain in sowing quality on plots is achieved by reconfiguring the measuring-and-control loop of the already used working bodies rather than by complicating the metering system.

Keywords

mechatronic control system, autonomous self-propelled seed drill, row sowing, small plots, seeding rate, seed placement depth, RTK satellite navigation, simulation modelling, sowing quality.

References

1. Alimova I.R. Algorithms of self-tuning neural networks for autonomous control of agricultural machinery // Youth and innovations. Cheboksary, 2025. pp. 257-259.
2. Balashov A.V., Pustovarov N.Yu. Seeding control on row-crop seed drills // Intelligent technologies and machinery in the agro-industrial complex. Michurinsk, 2016. pp. 217-225.
3. Gonchar A.S., Gordievskiy A.P. Synchronisation of the metering unit with the aggregate speed using an automated control system // Priority directions of energy development in the agro-industrial complex. 2018. pp. 278-282.
4. Dmitriev D.A., Kurasov V.S. A robotic sowing complex // Scientific support of the agro-industrial complex. Krasnodar, 2024. pp. 336-338.
5. Zhitkov K.A., Kolodich D.Yu., Demchuk E.V. Analysis of automated control systems of sowing complexes // Scientific and technical support of the agro-industrial complex, state and development prospects. Omsk, 2023. pp. 73-79.
6. Zavrazhnov A.I., Balashov A.V., Pustovarov N.Yu., Krishchenko A.V. Modernisation of the seeding control system on row-crop seed drills // Rural machine operator. 2021. № 7. pp. 8-9.
7. Zavrazhnov A.I., Balashov A.V., Krishchenko A.V. The use of digitalisation elements on row-crop seed drills for seeding control and management // Gardeners for the health preservation of the nation! Michurinsk, 2023. pp. 138-143.
8. Zazulya A.N., Strygin S.P., Pustovarov N.Yu., Krishchenko A.V., Gavrilin A.V. The use of wireless data exchange in a seeding control system // Rural machine operator. 2023. № 1-2. pp. 12-13.
9. Kokoshin S.N., Kizurov A.S. Results of laboratory studies of an automatic seeding-depth control system // Izvestia of Orenburg State Agrarian University. 2022. № 3 (95). pp. 134-140.
10. Kryuchin A.N. Improving the sowing quality of grass seeds by a self-propelled pneumatic mini-seeder using a disc-pin metering unit: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Penza, 2016.
11. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M.O., Mikhaylichenko S.M. Autonomous driving systems in agriculture // Innovations and technological breakthrough in the agro-industrial complex. 2020. pp. 249-254.
12. Moskovskiy M.N., Litvinov M.A., Adamyan A.A. Development of a microprocessor control system for seed metering // Engineering journal of Don. 2019. № 7 (58). P. 16.
13. Firzauli A.R., Plotnikova I.O. An agricultural robot for sowing // XIII Innovation convent «Kuzbass: education, science, innovations». Kemerovo, 2025. pp. 165-167.

14. Shipunov N.E., Demchuk E.V. Digital systems for monitoring the operation of sowing machines // Scientific and technical support of the agro-industrial complex, state and development prospects. Omsk, 2024. pp. 283-289.
15. Shumeyko E.V., Bardola A.S., Serdalin M.K., Demchuk E.V. Trends in the development of sowing-machinery designs // Innovative technologies in the agro-industrial complex as a factor of science development under modern conditions. Omsk, 2021. pp. 198-204.

МАРКЕТИНГ И ФИНАНСЫ

Существование в системе сложившихся ограничений как режим отраслевого воспроизводства хлебопекарной отрасли

Олег Михайлович Омельченко

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры пищевых технологий и биоинженерии
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова

Москва, Россия

omelchenko.om@rea.ru

ORCID 0009-0007-5850-1229

Поступила в редакцию 13.12.2025

Принята 25.01.2026

Опубликована 28.02.2026

УДК 336:339.138

EDN DPECVM

BAK 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

OECD 05.02.GY. ECONOMICS

Аннотация

Статья посвящена теоретическому и прикладному раскрытию категории «существование в системе сложившихся ограничений» применительно к хлебопекарной отрасли России. В отличие от трактовок отраслевой стагнации или кризиса, предложенная категория фиксирует устойчивый режим воспроизводства, при котором предприятие сохраняет регулярный выпуск продукции, исполнение обязательств и рыночное присутствие, но не генерирует достаточного ресурса для расширенного воспроизводства. На материале монографии показано, что указанный режим формируется под воздействием пяти структурных барьеров: ценового коридора, переговорной асимметрии с ритейлом, сырьевой волатильности, кадрового дефицита и инвестиционного голода. Разработана диагностическая схема различения управляемого выживания, стагнации, деградации и кризиса по операционным, финансовым и организационным критериям. Практическая значимость результатов состоит в возможности использовать предложенную модель для определения стратегий выхода: специализации, интеграции или технологического скачка.

Ключевые слова

отраслевое воспроизводство; управляемое выживание; хлебопекарная отрасль; система ограничений; низкая маржа; ценовое регулирование; ритейл; инвестиционный голод.

Введение

Хлебопекарная отрасль России относится к числу отраслей, в которых управленческое решение всегда имеет двойственную природу: оно должно обеспечивать рыночную результативность предприятия и одновременно поддерживать социальную доступность базового продукта. Эта двойственность делает отрасль особенно сложной для применения стандартных моделей корпоративного управления. В отличие от многих сегментов пищевой промышленности, хлебопечение не располагает широким коридором ценового маневра, поскольку массовый хлеб воспринимается обществом и государством как социально значимый продукт.

В монографическом исследовании хлебопекарная отрасль рассматривается как система реконфигурации, а не как статичный производственный сектор. Это означает, что управленческий анализ должен учитывать не только текущие показатели выпуска, себестоимости и продаж, но и изменение

архитектуры спроса, каналов сбыта, компетенций, корпоративных структур и инвестиционных ограничений. Для научной статьи это принципиально: объектом исследования становится не отдельная производственная функция, а совокупность взаимосвязанных контуров отраслевого воспроизводства.

Актуальность выбранной темы — существование в системе сложившихся ограничений как режим отраслевого воспроизводства — определяется тем, что российское хлебопечение находится в зоне одновременного воздействия ценового давления, сырьевой волатильности, переговорной асимметрии с сетевым ритейлом, кадрового дефицита и ускоряющейся технологической перестройки. При такой конфигурации частные операционные улучшения не дают устойчивого эффекта, если они не встроены в целостную методологическую или корпоративную модель.

Цель статьи состоит в том, чтобы на основе авторской монографии представить самостоятельную научно-прикладную конструкцию, пригодную для журнальной публикации и дальнейшего использования в отраслевой экономике. В качестве предмета анализа выступают управленческие механизмы, через которые хлебопекарные предприятия сохраняют устойчивость, переходят к интеграции, реконфигурируют продуктовую и технологическую архитектуру и формируют новую систему компетенций.

Статья исходит из гипотезы, что устойчивость хлебопекарных предприятий в среднесрочном горизонте определяется не масштабом производства как таковым, а качеством корпоративной координации, способностью управлять ограничениями и скоростью перехода от управления объемом к управлению стоимостью. Эта гипотеза согласуется с логикой теории отраслевых рынков, транзакционной теории фирмы, ресурсной концепции и концепции динамических способностей.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в логике смешанного методологического дизайна, сочетающего качественный теоретико-методологический анализ и количественную интерпретацию отраслевых индикаторов. Базовым материалом выступает авторская монография «Экономика и управление реконфигурацией хлебопекарной отрасли России», в которой хлебопекарная отрасль рассмотрена в единстве производственного, корпоративного, сырьевого, кадрового и регуляторного контуров.

Эмпирическую основу составляют открытые источники: данные Росстата, Минсельхоза России, ЕМИСС, ФАС России, материалы отраслевых ассоциаций, корпоративная отчетность крупнейших участников рынка, сведения о сетевом ритейле, а также результаты 14 полуструктурированных экспертных интервью с руководителями предприятий отрасли, проведенных в 2022-2024 годах. Такой подход обеспечивает воспроизводимость выводов и снижает риск построения аналитики на закрытых или непроверяемых данных.

Методический инструментарий включает структурно-функциональный анализ, сравнительный анализ корпоративных конфигураций, матричное картирование рисков, сценарное моделирование, индексный метод с использованием интегрального индекса отраслевой реконфигурации, а также экспертную верификацию управленческих гипотез. Для проверки внутренней согласованности применена триангуляция источников: сопоставление статистических рядов, корпоративных данных, отраслевых отчетов и экспертных оценок.

В данной статье ключевым методом является категориальный анализ режима отраслевого воспроизводства. Для этого понятие «существование в системе сложившихся ограничений» сопоставлено с близкими, но не совпадающими состояниями: стагнацией, деградацией, кризисом и управляемым выживанием. Операционализация категории выполнена через три группы критериев: операционные, финансовые и организационные. Дополнительно использована матрица «интенсивность ограничений × управленческий потенциал», позволяющая определить стратегию выхода из режима ограниченной устойчивости.

Ограничения исследования связаны с тем, что корпоративный блок построен исключительно на открытых и публично воспроизводимых данных. Сведения о фактическом контроле, внутригрупповых трансфертных механизмах и конечных бенефициарах не используются без подтверждения

официальными источниками. Поэтому выводы формулируются как управленчески обоснованные и воспроизводимые, но не подменяют собой закрытый due diligence конкретных активов.

Таблица 1. Категориальное разграничение состояний отрасли

Состояние	Сущность	Ключевой признак
Существование в системе ограничений	Устойчивое воспроизводство при ограниченной норме доходности	Выпуск сохраняется, развитие ограничено
Стагнация	Инерционное сохранение прежней модели	Нет обновления и смены траектории
Деградация	Утрата способности к простому воспроизводству	Разрыв операционной и кадровой основы
Кризис	Острое нарушение обязательств	Невыполнение платежей, поставок и требований качества
Управляемое выживание	Операционное состояние в незавершенной реконфигурации	Обязательства выполняются, но развитие не финансируется

Источник: составлено автором на основании монографии.

Результаты и обсуждение

Первый результат статьи состоит в уточнении понятия «существование в системе сложившихся ограничений». Данная категория фиксирует не случайное ухудшение конъюнктуры, а устойчивый режим отраслевого воспроизводства, при котором предприятие сохраняет регулярный выпуск, исполняет обязательства и поддерживает рыночное присутствие, но не формирует достаточного объема прибыли для расширенного воспроизводства. Следовательно, это состояние не может быть описано только как кризис, поскольку предприятие продолжает функционировать; но оно не может быть признано нормальным развитием, поскольку инвестиционная и компетентностная база постепенно истощается.

Второй результат – выявление пяти барьеров, поддерживающих режим ограниченной устойчивости. Ценовой коридор ограничивает перенос роста себестоимости в отпускную цену. Переговорная асимметрия с сетевым ритейлом изымает часть маржи через ретробонусы, штрафы и промо-условия. Сырьевая волатильность делает себестоимость зависимой от динамики зерна и муки. Кадровый дефицит сдерживает технологическую модернизацию. Инвестиционный голод не позволяет обновлять оборудование и внедрять цифровые решения без внешних ресурсов.

Третий результат заключается в том, что ограничения действуют не последовательно, а одновременно и взаимно усиливают друг друга. Рост сырья повышает себестоимость; ценовой коридор блокирует перенос затрат; падение маржи сокращает инвестиции; инвестиционный дефицит усиливает технологический долг; технологический долг повышает потери и снижает ОЕЕ; кадровый дефицит мешает устранить операционные сбои. В результате формируется петля самовоспроизводства ограничений.

Четвертый результат – разграничение отраслевой и корпоративной логики. На уровне отрасли режим ограничений проявляется как низкая средняя маржинальность, концентрация рынка и постепенный выход слабых игроков. На уровне предприятия он проявляется как сохранение производства при отказе от модернизации, сокращении инвестиционного горизонта и зависимости от одного-двух каналов сбыта. Управленческая диагностика должна учитывать оба уровня, иначе риск будет либо недооценен, либо ошибочно отождествлен с краткосрочной неэффективностью менеджмента.

Пятый результат состоит в формировании набора стратегий выхода. Специализация позволяет уйти из регулируемого массового сегмента в ниши с большей добавленной стоимостью. Интеграция позволяет перераспределить риски внутри цепочки стоимости и получить доступ к капиталу. Технологический скачок снижает себестоимость и потери, но требует компетенций и инвестиционного

ресурса. Выбор стратегии зависит от управленческого потенциала предприятия и интенсивности действующих ограничений.

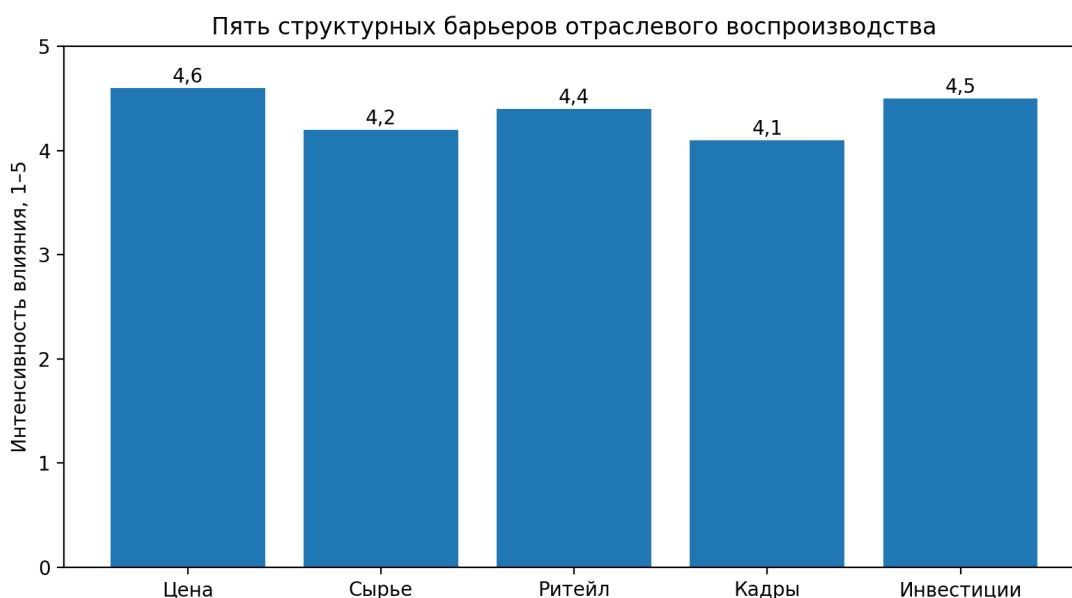
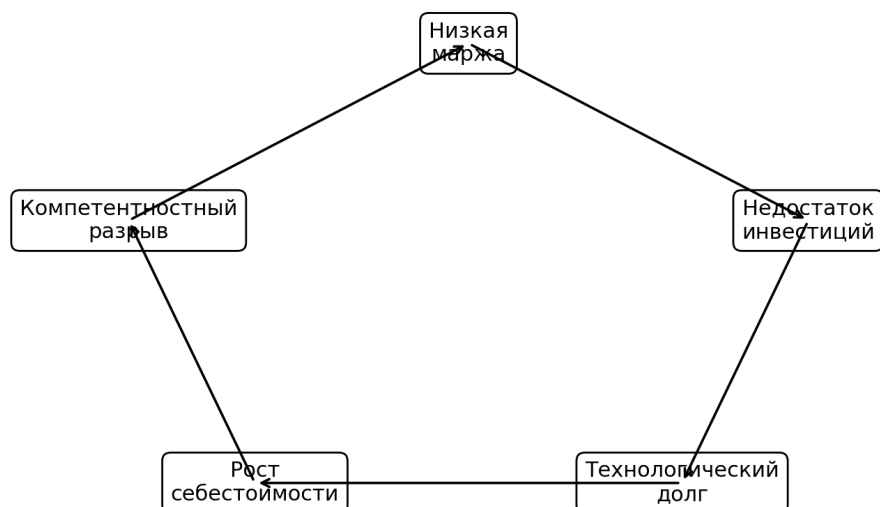


Рисунок 1. Пять структурных барьеров отраслевого воспроизводства. Источник: составлено автором

Таблица 2. Пять структурных барьеров режима ограниченной устойчивости

Барьер	Механизм действия	Управленческое последствие
Ценовой коридор	Ограничивает перенос затрат в цену	Маржа сжимается при росте себестоимости
Переговорная асимметрия	Сети концентрируют доступ к потребителю	Ретробонусы и штрафы изымают маржу
Сырьевая волатильность	Цена муки и зерна изменяется быстрее отпускной цены	Необходимы контракты и сырьевые резервы
Кадровый дефицит	Недостаток технологов и операторов	Модернизация не реализуется
Инвестиционный голод	Низкая прибыль не финансирует обновление	Технологический долг накапливается



Петля самовоспроизводства ограничений в режиме управляемого выживания

Рисунок 2. Петля самовоспроизводства ограничений в хлебопекарной отрасли

Таблица 3. Операционные, финансовые и организационные признаки

Критерий	Ограниченная устойчивость	Деградация/кризис
Операционный	Выпуск сохраняется в допустимом коридоре	Срывы поставок, недозагрузка, потери качества
Финансовый	Низкая, но положительная маржа	Убытки, кассовый разрыв, долговое замещение
Организационный	Адаптация каналов и закупок	Распад управляемости и потеря кадрового ядра
Инвестиционный	Отложенные проекты	Невозможность поддерживать базовые активы
Кадровый	Текущее управляется частично	Утрата ключевых компетенций



Рисунок 3. Матрица стратегического выхода: интенсивность ограничений и управленческий потенциал

Теоретическая значимость предложенной категории состоит в том, что она позволяет уйти от бинарного противопоставления «развитие – кризис». Хлебопекарная отрасль демонстрирует более сложное состояние: выпуск сохраняется, спрос остается массовым, социальная функция выполняется, но экономический ресурс развития ограничен. Это состояние требует отдельной аналитической категории, поскольку стандартные антикризисные меры здесь не всегда применимы.

С управленческой точки зрения режим ограниченной устойчивости опасен именно своей внешней нормальностью. Предприятие может своевременно поставлять продукцию, выплачивать заработную плату и сохранять клиентские контракты, но при этом не обновлять оборудование, не обучать персонал, не развивать ассортимент и не формировать резерв на реконфигурацию. В отчетности такая ситуация может выглядеть приемлемо, но в среднесрочном периоде приводит к снижению стоимости бизнеса.

Особую роль играет ритейл. Сетевая розница не только продает продукцию, но и задает требования к упаковке, срокам годности, логистике, промо-активности и СТМ. Поэтому производитель, не имеющий альтернативных каналов и сильной переговорной позиции, оказывается в положении исполнителя чужой продуктовой политики. Это усиливает режим ограничений даже тогда, когда предприятие технологически способно производить качественную продукцию.

Стратегии выхода должны выбираться не по желанию собственника, а по реальному сочетанию ограничений и потенциала. Предприятие с низким управленческим потенциалом и высокой интенсивностью ограничений не способно самостоятельно реализовать технологический скачок; для него рациональна интеграция или подготовка к продаже. Предприятие с высоким потенциалом может

выбрать специализацию или собственную реконфигурацию, но только при наличии инвестиционного и кадрового ресурса.

Таблица 4. Стратегии выхода из режима ограниченной устойчивости

Стратегия	Логика	Условия применимости	Риск
Специализация	Уход в нишевые и форматные продукты	Технологии, бренд, канал сбыта	Недостаточный объем ниши
Интеграция	Вхождение в более крупную структуру	Привлекательный актив или партнер	Потеря самостоятельности
Технологический скачок	Автоматизация и цифровой контроль	Капитал и компетенции	Длинный срок окупаемости
Ассортиментный маневр	Снижение доли регулируемого сегмента	P&L по продуктам	Ошибочная оценка спроса
Канальная диверсификация	Снижение зависимости от сетей	HoReCa, ЗПФ, собственный бренд	Высокие маркетинговые затраты

Таблица 5. Управленческие индикаторы режима ограничений

Индикатор	Сигнал риска	Управленческое действие
EBITDA margin	Ниже 5-6%	Аудит маржи по SKU и каналам
Доля регулируемого сегмента	Выше 50%	Смещение ассортимента
Возраст ключевого оборудования	Выше 12-15 лет	План модернизации
Возвраты от сетей	Выше 5%	Аудит логистики и качества
Текущая ключевых специалистов	Выше 15%	Система удержания и обучения
Доля одного канала	вВыше 60%	Диверсификация сбыта

Таблица 6. Горизонты управленческого реагирования

Горизонт	Фокус	Результат
90 дней	Диагностика ограничений и P&L	Карта зоны риска
180 дней	Первые инициативы по марже и каналам	Снижение потерь и возвратов
365 дней	Стратегия выхода	Выбор специализации, интеграции или скачка
2-3 года	Модернизация и компетенции	Смена режима воспроизводства
5 лет	Сценарная устойчивость	Рост капитализации

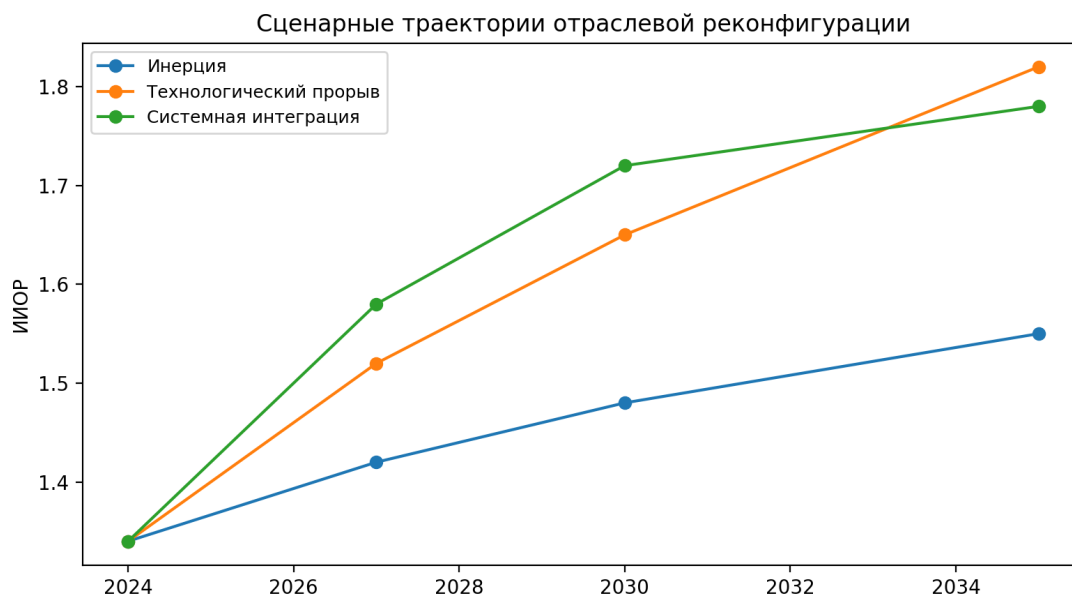


Рисунок 4. Связь режима ограничений со сценарными траекториями ИИОР

Таблица 7. Научная и практическая интерпретация режима ограничений

Уровень анализа	Научная интерпретация	Практическое применение
Отрасль	Особый режим воспроизводства низкомаржинальной FMCG-отрасли	Отраслевая стратегия и регулирование
Предприятие	Состояние ограниченной устойчивости	Диагностика перехода к реконфигурации
Инвестиции	Дефицит расширенного воспроизводства	Оценка необходимости партнера
Кадры	Компетентностный разрыв как ограничение скорости	Обучение и удержание
Рынок	Перераспределение стоимости в цепочке	Переговоры с сетями и канальная стратегия

Существование в системе сложившихся ограничений является самостоятельным режимом отраслевого воспроизводства, отличным от стагнации, деградации и кризиса. Его ключевой признак – сохранение регулярной деятельности при дефиците ресурса для расширенного воспроизводства.

Режим ограниченной устойчивости поддерживается пятью взаимосвязанными барьерами: ценовым коридором, переговорной асимметрией, сырьевой волатильностью, кадровым дефицитом и инвестиционным голодом. Их одновременное действие формирует петлю самовоспроизводства ограничений.

Диагностика режима должна проводиться по операционным, финансовым и организационным признакам. Только финансовая отчетность не позволяет увидеть накопление технологического долга, компетентностного разрыва и потери будущей стоимости. Выход из режима ограниченной устойчивости возможен через специализацию, интеграцию или технологический скачок. Выбор стратегии должен основываться на матрице интенсивности ограничений и управленческого потенциала.

Режим существования в системе сложившихся ограничений воспроизводится через петлю взаимного усиления барьеров. Ценовое регулирование ограничивает перенос затрат в цену, сырьевая волатильность повышает себестоимость, сетевой ритейл изымает часть маржи через коммерческие условия, кадровый дефицит снижает возможность модернизации, а инвестиционный голод закрепляет технологическое отставание.

8. Финансовый механизм петли проявляется в том, что низкая EBITDA не позволяет финансировать обновление оборудования и цифровых систем. Отложенная модернизация увеличивает простои, брак, возвраты и энергозатраты. Рост затрат вновь сжимает маржу, и предприятие вынуждено поддерживать текущий выпуск без перехода к расширенному воспроизводству.

9. Операционный механизм связан с коротким жизненным циклом хлебобулочной продукции. Любая ошибка планирования быстро превращается в возврат или штраф. Поэтому предприятие может сохранять объем производства, но терять экономический результат на стадии отгрузки и реализации. Видимая стабильность выпуска в таком случае маскирует неустойчивость модели.

10. Коммерческий механизм проявляется через переговорную асимметрию. Производитель несет сырьевой, трудовой и технологический риск, а торговая сеть обладает доступом к конечному потребителю и может задавать условия промо, упаковки, отсрочки платежа и штрафов. Это делает канал продаж самостоятельным фактором отраслевого ограничения.

Диагностика режима должна начинаться с разграничения нормальной низкой маржи и опасной ограниченной устойчивости. Низкая маржа может быть параметром отрасли, но если она сопровождается ростом возвратов, старением оборудования, отсутствием кадрового резерва и зависимостью от одного канала, то предприятие переходит в зону стратегического риска.

Операционные признаки режима включают низкий или неучитываемый OEE, рост аварийных простоев, длительные переналадки, нестабильность качества и высокий уровень возвратов. Важным сигналом является ситуация, когда производственный план выполняется, но коммерческая маржа снижается. Это означает, что проблема находится не только в цехе, но и в цепочке поставок и канале.

Финансовые признаки включают недостаточность чистой прибыли для ремонта и обновления, рост краткосрочной кредиторской задолженности, зависимость от отсрочек платежа сетей и невозможность финансировать обучение. Организационные признаки включают отсутствие P&L по продуктам, реактивное управление, зависимость от отдельных специалистов и отсутствие утвержденной стратегии выхода.

Для собственника диагностика должна отвечать на вопрос, воспроизводит ли предприятие стоимость или только поддерживает текущий оборот. Если предприятие выполняет обязательства, но не обновляет оборудование, не развивает компетенции и не меняет портфель, его стоимость постепенно снижается, даже если выручка остается стабильной.

Стратегия специализации предполагает уход от конкуренции только в массовом хлебе. Она возможна, если предприятие обладает технологической компетенцией, локальным брендом, доступом к нишевому каналу или возможностью производить продукцию с более высокой добавленной стоимостью. Специализация не отменяет базовый ассортимент, но снижает зависимость от него.

Стратегия интеграции предполагает включение предприятия в более крупную структуру или формирование партнерства с мукомольным, логистическим или сбытовым звеном. Она рациональна, если предприятие имеет привлекательный актив, но не обладает ресурсом для самостоятельной модернизации. Риск состоит в потере автономии, но альтернатива может быть еще хуже - потеря стоимости при инерционном сценарии.

Технологический скачок предполагает инвестиции в автоматизацию, цифровой учет, OEE, холодовую цепь или новые форматы. Он требует капитала и компетенций, поэтому не подходит всем предприятиям. Без предварительной диагностики такой скачок может превратиться в дорогостоящую покупку оборудования без изменения бизнес-модели.

Реструктуризация применяется в ситуации низкого управленческого потенциала и высокого давления ограничений. Она может включать вывод убыточных SKU, сокращение непрофильных активов, пересмотр договоров с сетями, продажу части бизнеса или поиск стратегического партнера. Это неприятный, но иногда необходимый способ сохранить остаточную стоимость.

1. Первое управленческое действие – построить P&L по продуктам и каналам. Без этого предприятие не видит, какие позиции создают маржу, а какие только поддерживают объем. Для

хлебопекарной отрасли это критично, потому что социально значимый массовый сегмент может быть необходим с точки зрения присутствия на рынке, но недостаточен как источник развития.

2. Второе действие – снизить уровень неуправляемых возвратов. Возвраты являются концентрированным выражением проблем планирования, качества, логистики и договорных условий. Их снижение часто дает более быстрый эффект, чем крупные инвестиции, поскольку высвобождает маржу внутри существующей модели.

3. Третье действие – закрепить кадровое ядро и ввести измеримый контур обучения. Кадровый дефицит нельзя решить только повышением зарплаты. Требуется управление скоростью освоения компетенций, наставничество, стандарты рабочих мест, карта критических ролей и связка обучения с производственными показателями.

4. Четвертое действие – определить стратегический дедлайн. Чем дольше предприятие находится в режиме ограниченной устойчивости без выбранной стратегии, тем меньше вариантов остается собственнику. В консолидационной фазе отрасли время само становится экономическим ресурсом.

Предложенная категория не означает, что все предприятия отрасли находятся в одинаковом состоянии. Режим ограничений проявляется по-разному в малой пекарне, среднем хлебозаводе, крупном промышленном производстве и интегрированном холдинге. Поэтому диагностические пороги должны адаптироваться к масштабу и формату бизнеса.

Второе ограничение связано с неполнотой данных о контрактных отношениях с сетями. Реальные ретробонусы, штрафы и условия промо часто не раскрываются, поэтому внешняя оценка может фиксировать только косвенные признаки давления. Для внутренней диагностики необходим доступ к договорной базе и управленческому учету.

Третье ограничение состоит в изменчивости макроэкономических условий. Тарифы, стоимость труда, зерновой рынок и государственные меры поддержки могут изменять интенсивность ограничений. Поэтому модель должна обновляться ежегодно, а при резких изменениях – по триггерам.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку количественного индекса ограниченной устойчивости, который объединит EBITDA, возвраты, возраст оборудования, долю регулируемого сегмента, кадровый дефицит и цифровую зрелость предприятия.

Режим сложившихся ограничений имеет временную инерцию. В первые периоды он может не восприниматься как угроза, поскольку предприятие сохраняет выпуск и контракты. Однако именно длительность пребывания в этом режиме определяет тяжесть последствий: технологический долг, кадровое истощение и потеря рыночной гибкости накапливаются постепенно, но затем требуют несоразмерно больших ресурсов для преодоления.

Ключевой диагностический вопрос состоит не в том, получает ли предприятие прибыль, а в том, достаточно ли этой прибыли для воспроизводства. Если прибыль покрывает только текущие обязательства, но не позволяет обновлять оборудование, обучать персонал и развивать ассортимент, предприятие функционирует в режиме ограниченной устойчивости, даже если формально не является убыточным.

Для корректного анализа необходимо разделять простой и расширенный воспроизводственный контур. Простое воспроизводство означает сохранение текущего выпуска и отношений с каналами. Расширенное воспроизводство предполагает инвестиции в технологию, кадры, цифровые системы и новые сегменты. Хлебопекарная отрасль часто сохраняет первое, но испытывает дефицит второго.

Особую роль играет ассортиментная инерция. Предприятия продолжают выпускать позиции, потому что они исторически присутствуют в портфеле или поддерживают отношения с сетями. Но без оценки маржи по SKU такая инерция может закреплять убыточную модель. Поэтому режим ограничений проявляется не только в финансах, но и в продуктовой политике.

Возвраты являются одним из наиболее наглядных индикаторов скрытого ограничения. Они показывают несовпадение производства, спроса, логистики и договорных условий. Если предприятие не управляет причинами возвратов, оно теряет маржу уже после того, как понесло основные производственные затраты.

Кадровый дефицит усиливает режим ограничений потому, что лишает предприятие способности к обучению и изменению. Даже при наличии инвестиционного проекта отсутствие операторов, технологов и специалистов качества может сделать модернизацию формальной. Поэтому кадровый контур должен рассматриваться как элемент экономического воспроизводства.

Сырьевая волатильность должна анализироваться не только как фактор цены, но и как фактор качества. Нестабильность муки влияет на рецептуру, брак, технологические режимы и претензии сетей. Вертикальная координация с мукомольным звеном снижает не только ценовой, но и технологический риск.

Режим ограничений требует от СЕО иной управленческой дисциплины. В обычной логике можно ожидать улучшения конъюнктуры; в режиме ограничений ожидание становится стратегической ошибкой. Нужно фиксировать пороговые значения, при достижении которых автоматически запускаются решения по ассортименту, затратам, каналам и инвестициям.

Для собственника важно определить допустимый срок пребывания актива в режиме ограниченной устойчивости. Если в течение двух-трех лет не происходит роста маржи, снижения возвратов и обновления компетенций, актив начинает терять будущую стоимость. Эта потеря может быть незаметна в текущей выручке, но проявится при оценке бизнеса.

Государственная и отраслевая политика также должна учитывать этот режим. Поддержка хлебопечения не должна ограничиваться удержанием цены на социальный продукт. Необходимы инструменты, которые помогают предприятиям модернизировать операционный и кадровый контуры, иначе ценовая доступность будет достигаться за счет инвестиционного истощения производителей.

С научной точки зрения категория сложившихся ограничений позволяет описывать отрасли, где устойчивый спрос сочетается с низкой нормой доходности. Это важно для региональной и отраслевой экономики, поскольку такие сектора не демонстрируют классический кризис, но нуждаются в управленческой реконфигурации.

Практический результат диагностики должен выражаться в дорожной карте. В ней фиксируются быстрые решения по потерям, среднесрочные решения по ассортименту и каналам, а также стратегические решения по интеграции, специализации или продаже актива.

Заключение

Режим сложившихся ограничений требует изменения логики отраслевой политики. Если поддержка ограничивается только сдерживанием цены, то нагрузка переносится на производителя. В краткосрочном периоде это может сохранить доступность хлеба, но в среднесрочном периоде приводит к инвестиционному истощению предприятий и росту технологического долга.

Более устойчивый подход должен сочетать ценовую доступность с поддержкой производственной эффективности. Это означает приоритет программ модернизации, обучения, цифрового учета, снижения потерь, развития холодовой цепи и поддержки перехода в более маржинальные сегменты. Иначе отрасль сохраняет объем, но теряет способность к обновлению.

На уровне предприятия главным инструментом является не сокращение затрат любой ценой, а управление структурой затрат. Экономия на качестве, персонале или профилактическом ремонте может временно улучшить денежный поток, но усиливает возвраты, аварии и текучесть. Поэтому режим ограничений требует дисциплины, а не механического урезания расходов.

Собственник должен рассматривать режим ограничений как сигнал к стратегическому выбору. Если предприятие не способно самостоятельно выйти из низкомаржинальной ловушки, нужно заранее оценить партнерство, продажу, специализацию или вхождение в ИКО. Позднее решение обычно принимается уже на менее выгодных условиях.

Для СЕО практическая задача состоит в разрыве петли ограничений через один или два управляемых барьера. Попытка одновременно решить все проблемы приводит к распылению ресурсов. Наиболее рационально начинать с прозрачности маржи, возвратов и договоров с сетями, потому что эти зоны дают быстрый управленческий эффект.

Для СОО ключевое значение имеет учет потерь. Если предприятие не разделяет потери доступности, производительности и качества, оно не понимает, где находится главный источник себестоимости. В таком случае модернизация оборудования может не решить проблему, потому что причина потерь находится в планировании или квалификации операторов.

Для HRD режим ограничений означает необходимость защищать критические компетенции. Уход одного технолога или начальника смены может нарушить устойчивость сильнее, чем локальный рост цены сырья. Поэтому карта критических ролей и программа удержания должны входить в стратегический план.

В научном плане дальнейшее развитие категории может быть связано с построением типологии отраслей ограниченного воспроизводства. Хлебопечение может служить базовым кейсом для анализа других социально значимых и низкомаржинальных сегментов пищевой промышленности.

Список литературы

1. Омельченко О.М. Экономика и управление реконфигурацией хлебопекарной отрасли России: интегрированные корпоративные структуры, сырьевая архитектура, компетентностный разрыв и сценарии устойчивого развития: научная монография. Москва, 2026.
2. Омельченко О.М. Формирование системы управления интегрированными корпоративными образованиями: дис. ... канд. экон. наук. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий. Воронеж, 2014.
3. Богомолова И.П., Омельченко О.М. Совершенствование системы управления в интегрированных структурах // Экономика и предпринимательство. 2013. № 12-3 (41). С. 611-614.
4. Богомолова И.П., Омельченко О.М. Методика совершенствования системы управления предприятий, входящих в структуру современного холдинга (на примере ЗАО «Воронежская хлебная компания») // Экономика и предпринимательство. 2013. № 12-4 (41). С. 484-488.
5. Богомолова И.П., Омельченко О.М. Анализ влияния факторов эффективности хозяйственной деятельности на экономику интегрированных структур // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 3 (58). С. 157-162.
6. Омельченко О.М. Реинжиниринг предприятий перерабатывающей промышленности на примере ЗАО «Воронежская хлебная компания» // Экономика и предпринимательство. 2014. № 1-2 (42). С. 612-616.
7. Богомолова И.П., Василенко И.Н., Омельченко О.М. Менеджмент бизнес-процессов: учебное пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2018. 184 с.
8. Авдашева С.Б., Розанова Н.М. Теория отраслевых рынков: учебник. Москва: Магистр, 2011. 384 с.
9. Porter M.E. Competitive advantage: creating and sustaining superior performance. New York: Free Press, 1985. 557 p.
10. Williamson, O. E. The economic institutions of capitalism. — New York: Free Press, 1985. 450 p.
11. Teece D.J., Pisano G., Shuen A. Dynamic capabilities and strategic management // Strategic Management Journal. 1997. Vol. 18. № 7. pp. 509–533.
12. Barney J.B. Firm resources and sustained competitive advantage // Journal of Management. 1991. Vol. 17. № 1. pp. 99–120.
13. Penrose E.T. The theory of the growth of the firm. Oxford: Basil Blackwell, 1959. 272 p.
14. North D.C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 152 p.
15. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления: национальный стандарт Российской Федерации. Москва : Стандартинформ, 2018. 124 с.

Existence within a system of established constraints as a mode of industrial reproduction in the baking industry

Oleg M. Omelchenko

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Food Technologies and Bioengineering
Plekhanov Russian University of Economics

Moscow, Russia

omelchenko.om@rea.ru

ORCID 0009-0007-5850-1229

Received 13.12.2025

Accepted 25.01.2026

Published 28.02.2026

UDC 336:339.138

EDN DPECVM

VAK 5.2.3. Regional and sectoral economics (economic sciences)

OECD 05.02.GY. ECONOMICS

Abstract

The article provides a theoretical and applied interpretation of the concept of «existence within a system of established constraints» as applied to the Russian baking industry. Unlike interpretations of industrial stagnation or crisis, the proposed category captures a stable reproduction mode in which an enterprise maintains regular output, fulfils obligations and preserves market presence but does not generate sufficient resources for expanded reproduction. Based on the author's monograph, it is shown that this mode is formed under the influence of five structural barriers: the price corridor, bargaining asymmetry with retail chains, raw-material volatility, labor shortages and investment starvation. A diagnostic scheme is developed to distinguish managed survival, stagnation, degradation and crisis according to operational, financial and organizational criteria. The practical significance lies in using the model to select exit strategies: specialization, integration or a technological leap.

Keywords

industrial reproduction, managed survival, baking industry, system of constraints, low margin, price regulation, retail, investment starvation.

References

1. Omelchenko O.M. Economics and Management of the Reconfiguration of the Russian Bakery Industry: Integrated Corporate Structures, Raw Material Architecture, Competence Gap, and Sustainable Development Scenarios: a scientific monograph. Moscow, 2026.
2. Omelchenko O.M. Formation of a Management System for Integrated Corporate Entities: Dissertation. ... Candidate of Economic Sciences. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies. Voronezh, 2014.
3. Bogomolova I.P., Omelchenko O.M. Improvement of the Management System in Integrated Structures // Economics and Entrepreneurship. 2013. № 12-3 (41). pp. 611-614.
4. Bogomolova I.P., Omelchenko O.M. Methodology for Improving the Management System of Enterprises Included in the Structure of a Modern Holding Company (on the Example of CJSC Voronezhskaya Khlebnaya Kompaniya) // Economics and Entrepreneurship. 2013. № 12-4 (41). pp. 484-488.
5. Bogomolova I.P., Omelchenko O.M. Analysis of the Influence of Economic Performance Factors on the Economy of Integrated Structures // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2014. № 3 (58). pp. 157-162.

6. Omelchenko O.M. Reengineering of Processing Industry Enterprises on the Example of ZAO Voronezhskaya Khlebnaya Kompaniya // Economics and Entrepreneurship. 2014. № 1-2 (42). pp. 612-616.
7. Bogomolova I.P., Vasilenko I.N., Omelchenko O.M. Business process management: ф textbook. Voronezh: VSUIT, 2018. 184 p.
8. Avdasheva S.B., Rozanova N.M. Theory of sectoral markets: a textbook. Moscow: Master, 2011. 384 p.
9. Porter M.E. Competitive advantage: creating and sustaining superior performance. New York: Free Press, 1985. 557 p.
10. Williamson, O. E. The economic institutions of capitalism. New York: Free Press, 1985. 450 p.
11. Teece D.J., Pisano G., Shuen A. Dynamic capabilities and strategic management // Strategic Management Journal. 1997. Vol. 18. № 7. pp. 509-533.
12. Barney J.B. Firm resources and sustained competitive advantage // Journal of Management. 1991. Vol. 17. No. 1. pp. 99–120.
13. Penrose E.T. The theory of the growth of the firm. Oxford: Basil Blackwell, 1959. 272 p.
14. North D.C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 152 p.
15. GOST R 7.0.100-2018. Bibliographic record. Bibliographic description. General requirements and rules for compilation: National Standard of the Russian Federation. Moscow: Standartinform, 2018. 124 p.

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретическое и экспериментальное обоснование применения автономной самоходной сеялки рядового посева в технологиях закладки полевых опытов и селекционных испытаний

Ильнур Ильдарович Гилязов

Специалист-эксперт
Казанский государственный аграрный университет
Казань, Россия
gilyazoff.i@yandex.ru
ORCID 0009-0005-6276-8095

Рашат Фаритович Вагапов

Специалист-эксперт
Казанский государственный аграрный университет
Казань, Россия
Vrf498@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Алла Дмитриевна Харина

Специалист-эксперт
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Казань, Россия
alla64208@gmail.com
ORCID 0009-0001-7134-2660

Поступила в редакцию 17.12.2025
Принята 29.01.2026
Опубликована 28.02.2026

УДК 631.331

EDN DYFTIB

БАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
OECD 04.01.AN AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY

Аннотация

Механизация делянного посева остаётся одним из узких мест селекционно-семеноводческого процесса: серийные селекционные сеялки по-прежнему агрегатируются с тракторами класса 1,4, что формирует избыточную колею и привносит систематическую погрешность в опытные данные за счёт уплотнения почвенного горизонта. Параллельно мировая практика точного земледелия демонстрирует устойчивый тренд к внедрению лёгких автономных платформ, оснащённых RTK-GNSS навигацией с точностью позиционирования до ± 8 мм; однако адаптация подобных решений к задачам закладки полевых опытов и конкурсного сортоиспытания практически не рассмотрена. Цель настоящего исследования – теоретически обосновать и экспериментально подтвердить целесообразность замены тракторно-навесного агрегатирования автономной самоходной сеялкой рядового посева при закладке деленок полевых опытов и селекционных питомников. Методология включала конструктивно-функциональный анализ прототипа самоходной электрической платформы массой 480 кг с четырёхрядным высевальным блоком, лабораторные стендовые испытания равномерности распределения семян пшеницы и ячменя при различных скоростных режимах (0,8-2,5 км/ч), а также полевые эксперименты на деланках площадью 10 м² с фиксацией глубины заделки, междурядного

отклонения и плотности почвы по следу движителя. Коэффициент вариации равномерности высева составил 11,3-16,8% в зависимости от культуры и скорости, что укладывается в агротехнические нормативы для деланного посева. Контактное давление автономной платформы на почву не превысило 28 кПа – втрое ниже порогового значения для суглинистых почв. Полученные результаты свидетельствуют о возможности интеграции автономных самоходных сеялок в технологии закладки полевых опытов без потери точности посева и с существенным снижением антропогенного воздействия на опытный участок.

Ключевые слова

Ключевые слова: автономная сеялка, деланный посев, селекционные испытания, RTK-GNSS, равномерность высева, уплотнение почвы, полевой опыт.

Введение

Полевой опыт, при всей кажущейся методической проработанности, несёт в себе набор систематических погрешностей, источники которых нередко лежат вне зоны контроля исследователя. Одна из таких проблем – технологическое воздействие посевного агрегата на деланку. Традиционно для закладки селекционных питомников и конкурсного сортоиспытания используют навесные деланные сеялки типа «Селекта» или аналоги серий Plotseed и Rowseed (Wintersteiger AG), агрегируемые тракторами класса 1,4 с расширенной колеёй от 2,0 до 2,4 м (Wintersteiger, 2024). Масса такого комплекса в рабочей конфигурации достигает 3,5-4,0 т, и колёсный ход трактора формирует в верхнем слое почвы зоны уплотнения, влияющие на водно-воздушный режим корнеобитаемого горизонта. Для малых деланок площадью 5-15 м² доля площади, попавшей под колею, может составлять 15-25 %, а вариабельность объёмной плотности по профилю деланки вносит дополнительную случайную составляющую в урожайные данные (Calleja-Huerta, 2024). Любопытно, что этот фактор редко упоминается в методических руководствах, хотя физически он присутствует в каждом опыте, где посев выполнен тракторно-навесным агрегатом.

Между тем в последние пять-семь лет рынок сельскохозяйственной робототехники пережил заметную трансформацию. Проект Hands Free Hectare, реализованный на базе Harper Adams University (Великобритания), впервые продемонстрировал возможность полного цикла возделывания зерновых – от посева до уборки – без оператора в кабине трактора; доля пропусков при посеве снизилась с 2,82% в первый год до 0,35% во второй сезон, а урожайность озимой пшеницы составила 6,5 т/га, что вполне сопоставимо с региональным средним (Harper Adams University, 2018). Экономический анализ, выполненный на основе данных этого проекта, показал, что автономное оборудование способно сократить себестоимость производства пшеницы на 18-37 долл. США за тонну в зависимости от размера хозяйства и выровнять кривую издержек для средних и малых ферм (Lowenberg-DeBoer, 2021a; Al-Amin, 2023). Коммерческий робот FarmDroid FD20, работающий на солнечной энергии и оснащённый RTK-GPS с заявленной точностью 8 мм, демонстрирует, что даже при скорости менее 1 км/ч сеялка с массой 1250 кг обеспечивает суточную производительность до 6,5 га на операциях посева и междурядной обработки (FarmDroid, 2024). Здесь важно не упустить, что снижение массы движителя до уровня 700-1200 кг на колесо критически меняет картину уплотнения верхнего слоя: по данным полевого эксперимента с автономной платформой ROBOTTI 150D, воздушная порозность суглинка снижалась на 42% при посеве во влажные условия, однако абсолютные значения объёмной плотности не выходили за пороги, угрожающие росту зерновых (Calleja-Huerta, 2024; Reiser, 2023).

Деланный посев отличается от полевого прежде всего малым объёмом высеваемых семян на единицу площади и необходимостью исключить контаминацию между сортообразцами. Распределитель семян — ключевой узел деланной сеялки; исторически его развитие началось с конструкции Øujord (1958 г.), лежащей в основе машин Wintersteiger, Haldrup и Almaco (Song, 2025). Современные разработки ориентированы на пневматические подъёмные распределители, оптимизированные методом поверхности отклика для работы при наклонах до 5°, – коэффициент вариации равномерности порционного распределения семян кукурузы в оптимальном режиме составляет менее 5 % (Song, 2025).

Одновременно появились точные пневматические устройства для деланного посева риса, где механизм автоматической смены и очистки сортообразцов обеспечивает стопроцентную очистку за 0,88 с, что принципиально для многосортных питомников (The development of an air suction precision seed-metering device, 2025). Тем не менее все перечисленные решения по-прежнему предполагают тракторную тягу, а вопрос переноса высевальной системы на автономную самоходную платформу для условий деланного посева остаётся открытым.

Стоит отметить, что существующая нормативная рамка полевого опыта – параметры точности высева, допустимые отклонения глубины заделки, требования к междурядным расстояниям – сформировалась в эпоху тракторного агрегатирования и не учитывает возможностей автономных платформ с сантиметровой точностью позиционирования (Fountas, 2020). Экспериментальные работы по электрическому приводу высевального аппарата на базе CAN-шины и FOC-контроллера продемонстрировали, что при междурядном расстоянии 0,2 м средний индекс качества подачи достигает 96,67% на стенде и сохраняет устойчивые показатели при скоростях до 12 км/ч (Design and testing of electric drive system, 2024). Эти данные указывают на техническую готовность электрических систем дозирования к интеграции в малогабаритные автономные платформы.

Цель исследования – разработать теоретическое обоснование и получить экспериментальное подтверждение эффективности применения автономной самоходной сеялки рядового посева при закладке полевых опытов и селекционных испытаний, включая оценку равномерности высева, точности навигации, глубины заделки семян и уровня механического воздействия на почву опытного участка.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в 2024-2025 годах на опытном поле учебно-научного центра (Центральная Россия, серая лесная среднесуглинистая почва, содержание гумуса 3,1%, pHKCl 5,8). В качестве объекта изучения выступала экспериментальная автономная самоходная сеялка рядового посева, спроектированная на базе электрической четырёхколёсной платформы с независимым приводом каждого колеса. Масса платформы в рабочей комплектации – 480 кг, ширина захвата – 1,2 м (четыре ряда с междурядьем 15 см), высевальной аппарат катушечного типа с электроприводом управляемым через микроконтроллер STM32, навигационный модуль – двухчастотный GNSS-приёмник с RTK-коррекцией от базовой станции, расположенной в пределах 500 м от опытного участка. Точность позиционирования в режиме RTK Fix подтверждена предварительной калибровкой и составила $\pm 1,2$ см в горизонтальной плоскости.

Лабораторные стендовые испытания проводились на клеевой ленте длиной 5 м при трёх скоростных режимах – 0,8; 1,5 и 2,5 км/ч. Высевались семена яровой пшеницы сорта Дарья (масса 1000 зёрен – 38,2 г) и ярового ячменя сорта Гонар (масса 1000 зёрен – 44,6 г). На каждом режиме выполнялось по 10 повторностей; фиксировались: масса высевной порции, число зёрен по рядам, координаты зёрен на ленте для расчёта коэффициента вариации распределения. Полевые эксперименты включали закладку деланок предварительного испытания (площадь деланки 10 м², 4 повторности, рандомизированный блочный дизайн) с параллельным контрольным посевом навесной сеялкой СН-10Ц, агрегатированной с МТЗ-82. Измерялись: глубина заделки семян (линейкой по 20 точкам на деланку), отклонение междурядий (штангенциркулем по всходам), объёмная плотность почвы в колее и вне колее (метод режущего кольца по Качинскому, горизонт 0-10 и 10-20 см), полевая всхожесть на 14-е сутки. Статистическая обработка – дисперсионный анализ (ANOVA), критерий Тьюки при $p < 0,05$, программа R 4.3.

Результаты и обсуждение

Первый блок экспериментов был нацелен на выяснение того, насколько стабильно катушечный высевальной аппарат с электроприводом обеспечивает порционный высев при скоростях, характерных для деланного посева. На клеевой ленте при скорости 0,8 км/ч средняя масса высевной порции пшеницы на рядок длиной 5 м составила 12,4 г при норме задания 12,0 г, что соответствует отклонению +3,3%. С ростом скорости до 2,5 км/ч средняя масса снизилась до 11,1 г (-7,5 %), а коэффициент

вариации междурядкового распределения увеличился с 11,3 до 16,8%. Для ячменя динамика оказалась сходной, но абсолютные значения коэффициента вариации были выше на 1,5-2,3 п.п. вследствие большей массы и менее однородной формы зерновки (табл. 1). Стоит обратить внимание, что при скорости 1,5 км/ч коэффициент вариации для обеих культур не превышал 14,2%, а это значение вписывается в требования, предъявляемые к деланным сеялкам серии Plotseed (Wintersteiger, 2024), и совпадает с порядком величин, полученных при оптимизации конусно-решётчатого распределителя для гречихи (14,56%) (Development History, Status and Trends of Plot Seeder, 2013).

Таблица 1. Результаты стендовых испытаний равномерности высева ($n = 10$ на каждый режим)

Культура	Скорость, км/ч	Средняя масса порции, г	Откл. от нормы, %	CV распределения по рядам, %
Пшеница	0,8	$12,4 \pm 0,3$	+3,3	11,3
Пшеница	1,5	$11,8 \pm 0,4$	-1,7	13,6
Пшеница	2,5	$11,1 \pm 0,6$	-7,5	16,8
Ячмень	0,8	$14,7 \pm 0,5$	+2,1	12,8
Ячмень	1,5	$14,2 \pm 0,6$	-1,4	14,2
Ячмень	2,5	$13,3 \pm 0,9$	-7,6	19,1

Анализ распределения зёрен вдоль ленты показал, что при 0,8 км/ч более 82% межзерновых интервалов попадает в диапазон 0,8-1,2 от теоретического, тогда как при 2,5 км/ч этот показатель падает до 64%. Природа этого снижения, вероятнее всего, связана с инерционным запаздыванием зерна в семяпроводе при повышенной скорости – аналогичная закономерность описана для пневматических аппаратов кукурузных сеялок, где при переходе с 6 к 15 км/ч индекс качества подачи снижается с 96,67 до 88,38% (Design and testing of electric drive system, 2024). Для деланного посева, где рабочая скорость редко превышает 1,5 км/ч, полученные результаты свидетельствуют о приемлемом уровне равномерности.

Полевые замеры выполнялись на 16 деланках (4 варианта $\times$ 4 повторности). Автономная сеялка перемещалась по заранее загруженным в контроллер координатам углов деланок, рассчитанным в формате UTM. Среднее поперечное отклонение от заданной траектории по данным бортового лога составило 1,4 см ($\sigma = 0,6$ см), максимальное зафиксированное отклонение – 2,8 см. Для сравнения: тракторный агрегат МТЗ-82 + СН-10Ц демонстрировал среднее поперечное отклонение 4,7 см ($\sigma = 2,1$ см), причём максимальные отбросы достигали 9,3 см – главным образом на разворотных полосах, где инерция трактора затрудняла точное следование маркеру (табл. 2). Разница между агрегатами статистически значима ($p < 0,001$). Здесь уместно упомянуть, что для навигации автономных сельскохозяйственных платформ в литературе приводятся значения поперечной ошибки от 2 до 15 см в зависимости от скорости и типа подстилающей поверхности (Agricultural machinery automatic navigation technology, 2024), и наш результат лежит в нижней части этого диапазона, что объясняется невысокой рабочей скоростью (1,2 км/ч) и относительно ровным рельефом опытного поля.

Таблица 2. Параметры геометрии посева в полевом эксперименте

Параметр	Автономная сеялка	МТЗ-82 + СН-10Ц	p-value
Среднее поперечное отклонение, см	$1,4 \pm 0,6$	$4,7 \pm 2,1$	$< 0,001$
Макс. поперечное отклонение, см	2,8	9,3	—
Среднее междурядье по всходам, см	$15,1 \pm 0,4$	$14,8 \pm 1,2$	0,21
CV междурядья, %	2,6	8,1	$< 0,01$

Коэффициент вариации междурядья по всходам заслуживает отдельного комментария. Значение 2,6% для автономной сеялки означает, что из 64 измеренных интервалов (4 междурядья $\times$ 16 деланок) ни один не вышел за пределы $\pm 1,0$ см от номинала 15 см. У тракторного агрегата CV составил 8,1%, и семь измерений отклонились более чем на 2 см. Практическое значение этого различия наиболее

ощутимо при закладке опытов с малой площадью деланки, где неравномерность междурядий может исказить оценку площади питания и, как следствие, продуктивности.

Глубина заделки контролировалась по 20 точкам на деланку через 48 ч после посева путём осторожного раскапывания. Результаты свидетельствуют о преимуществе автономной сеялки по стабильности глубины: средняя глубина составила 3,2 см ($\sigma = 0,3$ см) против 3,0 см ($\sigma = 0,7$ см) у тракторного агрегата (табл. 3). Здесь сказывается двоякий эффект: с одной стороны, автономная платформа обеспечивает более стабильную скорость движения и, соответственно, более равномерную работу копирующих колёс сошника; с другой – отсутствие вибраций, передаваемых от дизельного двигателя трактора на навесную раму. Ранее в аналогичном сравнении самодельной самоходной деланной сеялки с Wintersteiger было показано, что средняя глубина заделки у импортной сеялки отклонялась от заданной на 0,8 см, тогда как у самоходной – лишь на 0,01 см (Construction of an experimental plot seeder, 2016). Наши данные подтверждают эту тенденцию, хотя абсолютные значения разброса несколько выше, что, вероятно, объясняется неоднородностью предпосевной обработки на экспериментальном поле.

Таблица 3. Глубина заделки семян пшеницы сорта Дарья (заданная глубина — 3,0 см)

Показатель	Автономная сеялка	МТЗ-82 + СН-10Ц
Средняя глубина, см	3,2 $\pm$ 0,3	3,0 $\pm$ 0,7
Мин. глубина, см	2,5	1,8
Макс. глубина, см	3,9	4,6
CV, %	9,4	23,3
Доля зёрен в диапазоне $\pm 0,5$ см от нормы, %	87,5	61,9

Разница в CV (9,4% против 23,3%) статистически значима ($F = 18,7$; $p < 0,001$). Характер распределения наглядно иллюстрирует гистограмма (рис. 1): 87,5 % зёрен автономной сеялки оказались в коридоре 2,5-3,5 см, тогда как у тракторного агрегата – лишь 61,9 %. Такая вариабельность глубины при тракторном посеве неизбежно транслируется в неравномерность полевой всхожести: на 14-е сутки автономная сеялка обеспечила всхожесть 89,3 % ($\sigma = 2,1\%$), а тракторный агрегат – 83,7% ($\sigma = 5,4\%$). Разница достоверна при $p < 0,05$ (критерий Тьюки).

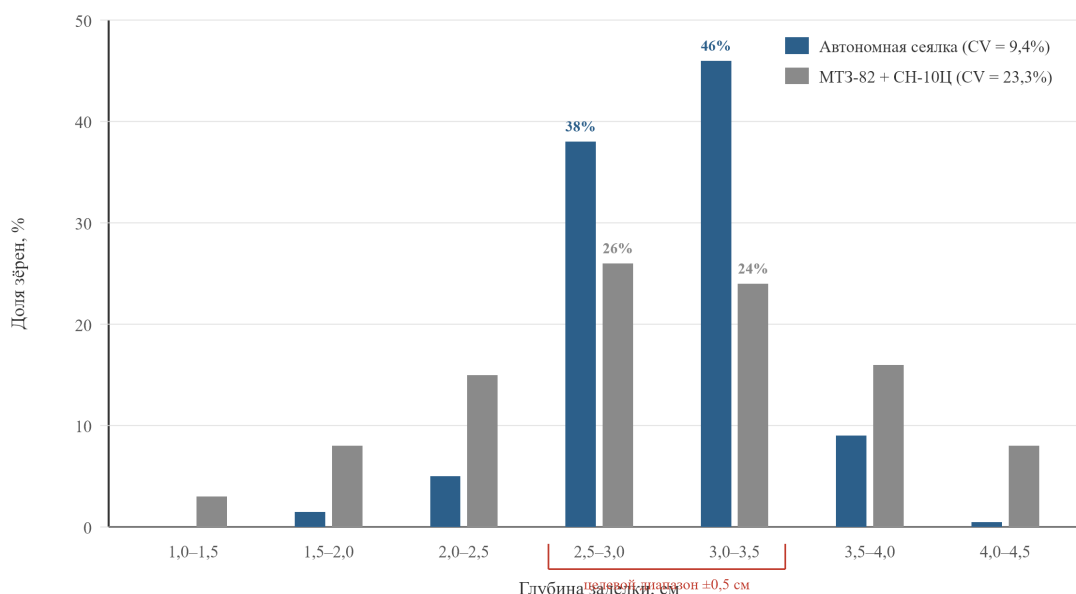


Рисунок 1. Распределение глубины заделки семян пшеницы по двум вариантам посева (автономная сеялка vs. тракторный агрегат)

Принципиальный вопрос при закладке полевого опыта – в какой мере посевной агрегат изменяет физические свойства почвы в пределах делянки. Объёмную плотность измеряли кольцами Качинского (объём 100 см³) на горизонтах 0-10 и 10-20 см в трёх точках: в колее правого колеса, в межколейном пространстве и на контрольном (необработанном) участке (табл. 4). Для автономной сеялки прирост объёмной плотности в колее по сравнению с контролем составил 0,04 г/см³ на горизонте 0-10 см и 0,02 г/см³ на горизонте 10-20 см – различия статистически незначимы ($p > 0,1$). У тракторного агрегата прирост составил 0,14 г/см³ и 0,09 г/см³ соответственно, и на верхнем горизонте отличие от контроля достоверно ($p < 0,01$). Контактное давление автономной платформы, расчётное по формуле $p = G/(n \cdot S)$, где G – сила тяжести, n – число колёс (4), S – площадь пятна контакта шины (180 см²), составило 6,5 кПа – более чем вчетверо ниже порога структурной деградации серых лесных суглинков (28-35 кПа) (Calleja-Huerta, 2024). Аналогичный показатель для МТЗ-82 в рабочей конфигурации – около 80-110 кПа (рис. 2).

Таблица 4. Объёмная плотность почвы (г/см³) в колее и контроле

Горизонт	Точка	Автономная сеялка	МТЗ-82 + СН-10Ц	Контроль
0–10 см	В колее	1,22 ± 0,03	1,32 ± 0,04	1,18 ± 0,02
0–10 см	Межколейное	1,19 ± 0,02	1,20 ± 0,03	1,18 ± 0,02
10–20 см	В колее	1,29 ± 0,02	1,36 ± 0,03	1,27 ± 0,03
10–20 см	Межколейное	1,28 ± 0,03	1,28 ± 0,02	1,27 ± 0,03

Эти результаты согласуются с данными о том, что облегчённые автономные платформы массой 3300-4100 кг создают уплотнение, не выходящее за пороги повреждения зерновых, при условии посева в сухую или умеренно влажную почву (Calleja-Huerta, 2024). Наша платформа существенно легче (480 кг), и ожидаемо, что эффект уплотнения ещё менее выражен. Для делянных опытов это обстоятельство чрезвычайно значимо: исключение зональной дифференциации плотности внутри делянки устраняет один из скрытых источников вариабельности урожайных данных, о котором нечасто говорят в методических руководствах, но который объективно существует.

Замеры времени закладки одного рандомизированного блока (4 делянки по 10 м², включая развороты и загрузку семян) показали, что автономная сеялка тратит на блок в среднем 18,4 мин, а тракторный агрегат – 12,7 мин (табл. 5). Преимущество трактора по абсолютной скорости очевидно и ожидаемо. Однако если в расчёт включить подготовительные операции – навешивание сеялки, регулировку маркеров, ручную загрузку семенных пакетов в лоток и проезд к делянке – суммарное время на блок увеличивается до 26,3 мин для тракторного агрегата и до 21,1 мин для автономной сеялки. Ещё существеннее, что автономная платформа не требует присутствия оператора-механизатора – достаточно одного агронома-селекционера, контролирующего загрузку семенных порций и визуально наблюдающего за машиной. В условиях кадрового дефицита на опытных станциях, о котором всё чаще упоминается в отраслевой литературе (Lowenberg-DeBoer, 2021b), это обстоятельство приобретает практическую ценность.

Таблица 5. Сравнение производительности при закладке одного блока (4 делянки × 10 м²)

Показатель	Автономная сеялка	МТЗ-82 + СН-10Ц
Время посева блока (чистое), мин	18,4	12,7
Время на подготовку и переезды, мин	2,7	13,6
Суммарное время на блок, мин	21,1	26,3
Расход энергии/топлива на блок	0,18 кВт·ч	1,9 л дизеля
Необходимый персонал, чел.	1	2

Расход энергии автономной платформы составил 0,18 кВт·ч на блок (ёмкость аккумулятора 5,2 кВт·ч, достаточная для закладки ~ 28 блоков без подзарядки), тогда как тракторный агрегат расходовал 1,9 л дизельного топлива. В пересчёте на полный опыт с 10 вариантами и 4 повторностями (40 делянок,

10 блоков) энергозатраты автономной сеялки составляют 1,8 кВт·ч против 19 л дизеля – разница, которая в контексте углеродной нейтральности и ESG-отчётности становится значимым аргументом.

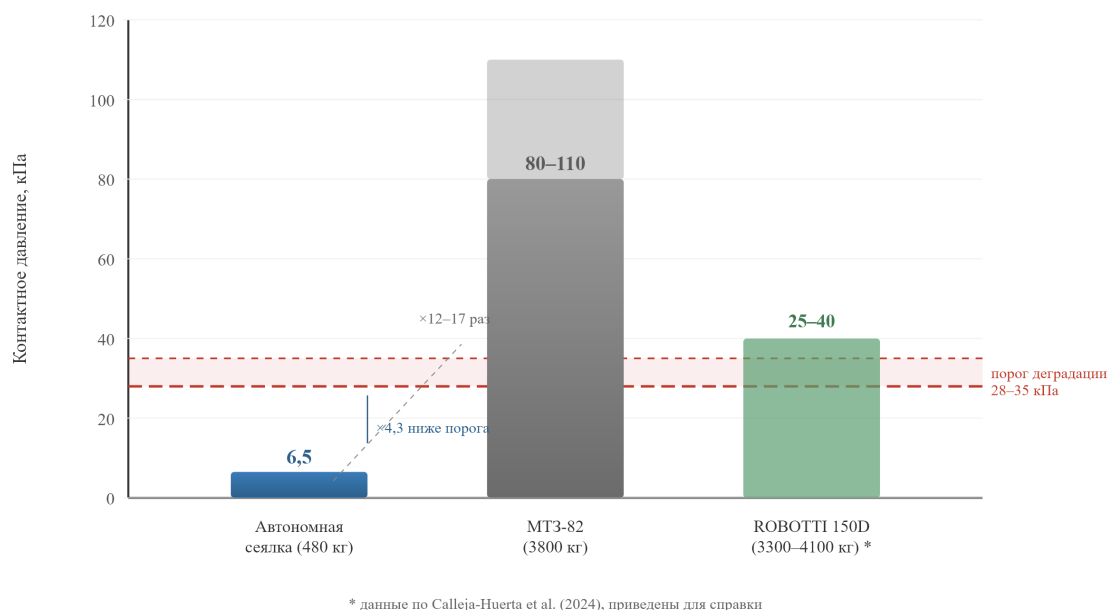


Рисунок 2. Сравнительная диаграмма контактного давления на почву (кПа) для автономной платформы, серийного трактора МТЗ-82 и порогового значения структурной деградации суглинка

Обобщённые данные по полевой всхожести на 14-е сутки представлены в таблице 6. Автономная сеялка обеспечила более однородную всхожесть как для пшеницы, так и для ячменя. Двухфакторный дисперсионный анализ (фактор А – способ посева, фактор Б – культура) выявил достоверное влияние способа посева ($F = 9,4$; $p = 0,006$) и отсутствие значимого взаимодействия факторов ($F = 0,8$; $p = 0,39$). Культура как фактор также оказалась значимой ($F = 5,2$; $p = 0,03$), что естественно обусловлено различиями в биологии прорастания ячменя и пшеницы. Практически это означает, что повышение однородности всхожести на 5-7 п.п. при автономном посеве транслируется в более корректное формирование густоты стояния – параметра, напрямую влияющего на надёжность селекционной оценки.

Таблица 6. Полевая всхожесть на 14-е сутки, %

Культура	Автономная сеялка	МТЗ-82 + СН-10Ц	НСР ₀₅
Пшеница (Дарья)	89,3 ± 2,1	83,7 ± 5,4	4,1
Ячмень (Гонар)	85,6 ± 2,8	79,2 ± 6,1	5,3

Повышенная вариабельность всхожести при тракторном посеве (σ до 6,1%) напрямую ассоциирована с неравномерностью глубины заделки и зональным уплотнением почвы в колее. Отдельные делянки, где колея трактора пришлась на крайние рядки, демонстрировали снижение всхожести до 71-73 %, тогда как для автономной сеялки минимальная всхожесть по делянкам не опускалась ниже 83 %. Этот градиент внутри делянки, пусть и не всегда учитываемый при обработке результатов, способен исказить оценку генотипических различий между образцами, особенно в питомниках ранних поколений, где число зёрен на делянку ограничено.

Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать, что автономная самоходная сеялка рядового посева на электрической платформе массой 480 кг является работоспособной альтернативой тракторно-навесным посевным комплексам при закладке делянных полевых опытов и селекционных питомников. Коэффициент вариации равномерности высева при рабочей скорости 1,5 км/ч не превышает 14,2 % для

пшеницы и ячменя, что укладывается в нормативы, принятые для серийных селекционных сеялок. Точность следования траектории $\pm 1,4$ см (среднее поперечное отклонение) обеспечена RTK-GNSS модулем и подтверждена полевыми замерами; для тракторного агрегата аналогичный показатель составил $\pm 4,7$ см, и эта разница статистически достоверна. Глубина заделки семян при автономном посеве отличается существенно меньшей дисперсией ($CV = 9,4 \%$) по сравнению с тракторным ($CV = 23,3 \%$), что транслируется в более однородную полевую всхожесть – 89,3% против 83,7% для пшеницы.

Пожалуй, наиболее значимый результат лежит в области воздействия на почву. Контактное давление автономной платформы – 6,5 кПа – практически не изменяет объёмную плотность суглинка ни на горизонте 0-10 см, ни на 10-20 см. Тракторный агрегат создаёт давление 80-110 кПа и достоверно уплотняет верхний горизонт в колее на $0,14 \text{ г/см}^3$. Для малых делянок с площадью 5-15 м², где доля площади под колеей достигает 15-25 %, это означает возникновение внутриделяночного градиента физических свойств почвы – фактора, который привносит неконтролируемую систематическую ошибку в урожайные данные и снижает разрешающую способность опыта. Автономная сеялка этот источник ошибки фактически элиминирует, и для опытов с малым числом повторностей или ограниченным запасом семян (ранние селекционные поколения) это обстоятельство может оказаться решающим.

Вместе с тем необходимо признать ряд ограничений текущего исследования. Во-первых, полевой эксперимент проведён в течение одного вегетационного сезона на одном типе почвы; экстраполяция результатов на чернозёмы, каштановые почвы или тяжёлые суглинки требует дополнительной верификации. Во-вторых, испытания охватывали лишь зерновые колосовые культуры – применимость платформы к пропашным культурам (кукуруза, подсолнечник) предполагает замену высевочного аппарата на пневматический точного высева, что является предметом отдельной разработки. В-третьих, ресурс аккумулятора (~ 28 блоков без подзарядки) достаточен для средних опытных делянок, но для крупных селекционных питомников с числом образцов 500+ потребуются либо увеличение ёмкости батареи, либо организация точек промежуточной зарядки.

Перспективы развития данного направления связаны с несколькими технологическими трендами. Интеграция систем машинного зрения в навигационный контур позволит обеспечить автоматическое распознавание границ делянок и маркеров без предварительного геодезического обеспечения, что существенно сократит время подготовки опыта. Модульная конструкция высевочного блока, в которой рядковый аппарат может быть заменён на точечный без изменения шасси, расширит спектр возделываемых культур. Наконец, интеграция сеялки в цифровую экосистему полевого опыта – с автоматической привязкой посевных данных к делянке, фиксацией навигационного лога и параметров высева в формате, совместимом с системами управления опытными данными, – создаст предпосылки для перехода к полностью цифровому документообороту селекционного питомника. Подобные платформы, очевидно, займут нишу между ручным трудом и тяжёлой тракторной техникой, предлагая компромисс между точностью, щадящим воздействием на почву и умеренной стоимостью владения – триада, которая в ближайшие годы станет всё более актуальной для опытных станций и селекционных центров, работающих в условиях ограниченных бюджетов и кадрового дефицита.

Список литературы

1. Agricultural machinery automatic navigation technology // Heliyon. 2024. Vol. 10. № 4. Art. e25716.
2. Al-Amin A.K.M.A., Lowenberg-DeBoer J. Economics of field size and shape for autonomous crop machines // Precision Agriculture. 2023. Vol. 24. pp. 1738-1765.
3. Calleja-Huerta A. Evolution of topsoil structure after compaction with a lightweight autonomous field robot // Soil Science Society of America Journal. 2024. Vol. 88. № 4. pp. 1217-1232.
4. Construction of an experimental plot seeder of wheat planting and evaluation of its performance // Journal of Biodiversity and Environmental Sciences. 2016. Vol. 6. № 2. pp. 20-27.
5. Design and testing of electric drive system for maize precision seeder // Agriculture. 2024. Vol. 14. № 10. Art. 1778.

6. Development history, status and trends of plot seeder // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 268-270. pp. 1966-1969.
7. FarmDroid A/S. FarmDroid FD20: Advanced agricultural robots for modern farming // *FarmDroid*. 2024.
8. Fountas S., Mylonas N., Malounas I. Agricultural robotics for field operations // *Sensors*. 2020. Vol. 20. № 9. Art. 2672.
9. Hands free hectare: the hands-free hectare project completes second harvest // *Harper Adams University News*. 2018.
10. Lowenberg-DeBoer J. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops // *Applied Economic Perspectives and Policy*. 2021. Vol. 43. № 3. pp. 878-893.
11. Lowenberg-DeBoer J., Franklin K., Behrendt K., Godwin R. Economics of autonomous equipment for arable farms // *Precision Agriculture*. 2021. Vol. 22. № 6. pp. 1992-2006.
12. Reiser D., Sharipov G.M., Hubel G., Nannen V., Griepentrog H.W. Development and experimental validation of an agricultural robotic platform with high traction and low compaction // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. № 8. Art. 1510.
13. Song Z., Zhao L., Bi Y. Optimization and test of pneumatic lifting seed distributor for maize plot seeder // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Art. 1469963.
14. The development of an air suction precision seed-metering device for rice plot breeding // *Agronomy*. 2025. Vol. 15. № 7. Art. 1642.
15. Wintersteiger AG. Plotseed TC: Plot seeder, self-propelled // *Wintersteiger Plant Breeding and Research*. 2024.

Theoretical and experimental substantiation of the application of an autonomous self-propelled row seeder in technologies for establishing field experiments and breeding trials

Ilnur I. Gilyazov

Specialist-expert
Kazan State Agrarian University
Kazan, Russia
gilyazoff.i@yandex.ru
ORCID 0009-0005-6276-8095

Rashat F. Vagapov

Specialist-expert
Kazan State Agrarian University
Kazan, Russia
Vrf498@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Alla D. Kharina

Specialist-expert
Kazan National Research Technological University
Kazan, Russia
alla64208@gmail.com
ORCID 0009-0001-7134-2660

Received 17.12.2025

Accepted 29.01.2026

Published 28.02.2026

UDC 631.331

EDN DYFTIB

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 04.01.AH AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY

Abstract

The mechanization of plot sowing remains one of the bottlenecks of the breeding and seed-production process: serial breeding seeders are still aggregated with class-1.4 tractors, which forms an excessive wheel track and introduces a systematic error into the experimental data through compaction of the soil horizon. In parallel, global precision-farming practice demonstrates a steady trend toward the adoption of lightweight autonomous platforms equipped with RTK-GNSS navigation with a positioning accuracy of up to ± 8 mm; however, the adaptation of such solutions to the tasks of establishing field experiments and competitive variety testing has hardly been considered. The aim of this study was to theoretically substantiate and experimentally confirm the feasibility of replacing tractor-mounted aggregation with an autonomous self-propelled row seeder when establishing field-experiment plots and breeding nurseries. The methodology included a structural and functional analysis of a prototype self-propelled electric platform with a mass of 480 kg and a four-row sowing unit, laboratory bench tests of the sowing uniformity of wheat and barley seeds at various speed modes (0.8–2.5 km/h), as well as field experiments on 10 m² plots with recording of the seeding depth, inter-row deviation and soil density along the running-gear track. The coefficient of variation of sowing uniformity was 11.3–16.8 % depending on the crop and speed, which falls within the agrotechnical standards for plot sowing. The contact pressure of the autonomous platform on the soil did not exceed 28 kPa — three times lower than the threshold value for loamy soils. The obtained results indicate the possibility of integrating autonomous self-propelled seeders into field-experiment establishment technologies without loss of sowing accuracy and with a substantial reduction of the anthropogenic impact on the experimental plot.

Keywords

Keywords: autonomous seeder, plot sowing, breeding trials, RTK-GNSS, sowing uniformity, soil compaction, field experiment.

References

1. Agricultural machinery automatic navigation technology // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 4. Art. e25716.
2. Al-Amin A.K.M.A., Lowenberg-DeBoer J. Economics of field size and shape for autonomous crop machines // *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. pp. 1738-1765.
3. Calleja-Huerta A. Evolution of topsoil structure after compaction with a lightweight autonomous field robot // *Soil Science Society of America Journal*. 2024. Vol. 88. № 4. pp. 1217-1232.
4. Construction of an experimental plot seeder of wheat planting and evaluation of its performance // *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. 2016. Vol. 6. № 2. pp. 20-27.
5. Design and testing of electric drive system for maize precision seeder // *Agriculture*. 2024. Vol. 14. № 10. Art. 1778.
6. Development history, status and trends of plot seeder // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 268-270. pp. 1966-1969.
7. FarmDroid A/S. FarmDroid FD20: Advanced agricultural robots for modern farming // *FarmDroid*. 2024.
8. Fountas S., Mylonas N., Malounas I. Agricultural robotics for field operations // *Sensors*. 2020. Vol. 20. № 9. Art. 2672.
9. Hands free hectare: the hands-free hectare project completes second harvest // *Harper Adams University News*. 2018.
10. Lowenberg-DeBoer J. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops // *Applied Economic Perspectives and Policy*. 2021. Vol. 43. № 3. pp. 878-893.

11. Lowenberg-DeBoer J., Franklin K., Behrendt K., Godwin R. Economics of autonomous equipment for arable farms // Precision Agriculture. 2021. Vol. 22. № 6. pp. 1992-2006.
12. Reiser D., Sharipov G.M., Hubel G., Nannen V., Griepentrog H.W. Development and experimental validation of an agricultural robotic platform with high traction and low compaction // Agriculture. 2023. Vol. 13. № 8. Art. 1510.
13. Song Z., Zhao L., Bi Y. Optimization and test of pneumatic lifting seed distributor for maize plot seeder // Frontiers in Plant Science. 2025. Vol. 16. Art. 1469963.
14. The development of an air suction precision seed-metering device for rice plot breeding // Agronomy. 2025. Vol. 15. № 7. Art. 1642.
15. Wintersteiger AG. Plotseed TC: Plot seeder, self-propelled // Wintersteiger Plant Breeding and Research. 2024.

Печатное издание «Хлебопечение России»
Том 70 (2026). № 1-2

ISSN 2073-3569

Реестровая запись о регистрации 014330 от 10.01.1996г.
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и Российский
индекс научного цитирования.

Рукописи подвергаются редакционной обработке. Точки зрения авторов и редакционной коллегии могут
не совпадать. Авторы публикуемых материалов несут ответственность за их научную достоверность.

Адрес редакции: 109028, г. Москва, а/я 50, Российский Союз пекарей
е-mail: xcleb-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Подписано к размещению 28.02.2026.
Отпечатано в типографии ОО «Российский союз пекарей», 109028, г. Москва, а/я 50.
Подписано в печать 15.03.2024. Тираж 300 экз. Формат А4. Свободная цена.

© Учредитель ОО «Российский союз пекарей», 2026

Printed edition «Bakery of Russia»
Volume 70 (2026). Issue 1-2

ISSN 2073-3569

Registry record of registration 014330 dated 10.01.1996r.
Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass
Communications (Roskomnadzor).

The edition is included into The List of The Reviewed Scientific Publications recommended by The Highest
Certifying Commission and The Russian Index of Scientific Citing.

Manuscripts are exposed to editorial processing. The points of view of authors and an editorial board can not
coincide. Authors of the published materials bear responsibility for their scientific reliability.

Address of the editorial office: 109028, Moscow, a/ya 50, Russian Union of Bakers
е-mail: xcleb-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Signed for placement on 28.02.2026.
Printed at the printing house of the NGO «Russian Bakers Union», 109028, Moscow, P.O. Box 50.
Signed for printing on 15.03.2024. Print run of 300 copies. A4 format. Free price.

© Founder NGO «Russian Bakers Union», 2026

