

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (80) 2025 ГОД

ВЕСТНИК

Казанского государственного аграрного университета



DOI 10.12737/issn.2073-0462 ISSN 2073-0462

ISSN 2073-0462
DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4

ВЕСТНИК
КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

VESTNIK
OF KAZAN STATE AGRARIAN UNIVERSITY

QUARTERLY SCIENTIFIC JOURNAL

№ 4 (80)

Казань, 2025

Научный журнал
Вестник Казанского ГАУ, 2025, № 4 (80), декабрь
Учрежден Казанским государственным аграрным университетом (Казанским институтом сельского хозяйства и лесоводства) в 1925 г.

Адрес издателя и редакции:
420015, г. Казань
ул. К. Маркса, 65
тел. (843) 598 - 40 -52

www.vestnik-kazgau.ru
e-mail: vestnik@kazgau.com

Подписной индекс в каталоге «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы» на II полугодие 2025 года: **40977**

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Росскомнадзор) - свидетельство о регистрации: ПИ № ФС-77-48189 от 19 января 2012 г.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

По решению ВАК России «Вестник Казанского государственного аграрного университета» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по направлениям:

4.1.1 «Общее земледелие и растениеводство»
4.1.2 «Селекция, семеноводство и биотехнология»
4.1.3 «Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений»
4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»
5.2.3 «Региональная и отраслевая экономика»
5.2.6 «Менеджмент»

Журнал «Вестник Казанского государственного аграрного университета» включен в базу Russian Science Citation Index (RSCI)

Публикуется
4 раза в год

За достоверность информации в опубликованных материалах ответственность несут авторы публикаций

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Председатель редакционной коллегии, главный научный редактор
Файзрахманов Д.И. – доктор экономических наук, профессор, академик АН РТ
Заместители главного редактора:
Валиев А.Р. – доктор технических наук, профессор, чл.-корр. АН РТ
Зиганшин Б.Г. – доктор технических наук, профессор, профессор РАН
Члены редакционной коллегии:
Мазитов Н.К. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. РАН
Сафин Р.И. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. АН РТ
Кадырова Ф.З. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. АН РТ
Сафиоллин Ф.Н. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Низамов Р.М. – доктор сельскохозяйственных наук, доцент
Исайчев В.А. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Васин А.В. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Замалиева Ф.Ф. – доктор сельскохозяйственных наук, доцент
Пономарева М.Л. – доктор биологических наук, профессор
Лобачевский Я. П. – доктор технических наук, академик РАН
Курдюмов В.И. – доктор технических наук, профессор
Калимуллин М.Н. – доктор технических наук, доцент
Клычова Г.С. – доктор экономических наук, профессор
Мухаметгалиев Ф.Н. – доктор экономических наук, профессор
Шогенов Ю.Х. – доктор технических наук, профессор, академик РАН
Дидманидзе О.Н. – доктор технических наук, профессор, академик РАН
Дозорова Т.А. – доктор экономических наук, профессор
Ерохин М.Н. – доктор технических наук, профессор, академик РАН
Сорокин К.Н. – доктор технических наук
Члены международной редакционной коллегии:
Бухарбаева А.Ж. – доктор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата
Панков Д.А. – доктор экономических наук, профессор, Белорусский государственный экономический университет
Сембиева Л. М. – доктор экономических наук, профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева
Абуова А.Б. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Международный инженерно-технологический университет
Акимбекова Г.У. – доктор экономических наук, профессор, Казахский НИИ экономики агропромышленного комплекса и развития сельских территорий
Ли Хунпэн – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник Хэйлунцзянской Академии Сельскохозяйственных наук, Основатель Харбинской сельскохозяйственной научно-технической компании Лэши

EDITORIAL BORD:
Editor-in-Chief
Fayzrakhmanov D.I. – Doctor of Economics, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan
Deputy Editors:
Valiev A.R. – Doctor of Engineering, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan
Ziganshin B.G. – Doctor of Engineering, professor, professor of the Russian Academy of Sciences
Members of the Editorial Board:
Mazitov N.K. – Doctor of Agriculture, professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences
Safin R.I. – Doctor of Agriculture, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan
Kadyrova F.Z. – Doctor of Agriculture, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan
Safiollin F.N. – Doctor of Agriculture, professor
Nizamov R.M. – Doctor of Agriculture, associate professor
Isaychev V.A. – Doctor of Agriculture, professor
Vasin A.V. – Doctor of Agriculture, professor
Zamalieva F.F. – Doctor of Agricultural Sciences, associate professor
Ponomareva M.L. – Doctor of Biological Sciences, professor
Lobachevskiy Ya. P. – Doctor of Engineering, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences
Kurdyumov V.I. – Doctor of Engineering, professor
Kalimullin M.N. – Doctor of Technical Sciences, associate professor
Klychova G.S. – Doctor of Economics, professor
Mukhametgaliev F.N. – Doctor of Economics, professor
Shogenov Yu.Kh. – Doctor of Technical Sciences, professor, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences
Didmanidze O.N. – Doctor of Technical Sciences, professor, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences
Dozorova T.A. – Doctor of Economic Sciences, Professor
Erohin M.N. – Doctor of Technical Sciences, Professor, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences
Sorokin K.N. – Doctor of Technical Sciences
Members of the International Editorial Board:
Bukharbaeva A.Zh. – Doctor, Kyzylorda University named after Korkyt Ata
Pankov D.A. – Doctor of Economics, professor, Belarusian State Economic University
Sembieva L.M. – Doctor of Economics, professor, Eurasian National University. L.N. Gumilyov
Abuova A.B. – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, International Engineering and Technology University
Akimbekova G.U. – Doctor of Economics, Professor, Kazakh Research Institute of Economics of the Agro-Industrial Complex and Rural Development
Li Hongpeng – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher at the Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Founder of Harbin Agricultural Science and Technology Company

©Вестник Казанского ГАУ, 2025
©Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

стр.

Акманаев Э. Д., Старцева А. В. Влияние биологических препаратов на перезимовку и урожайность зерна озимой тритикале в Среднем Предуралье……5
Блохин В. И., Никифорова И. Ю., Кадырова Ф. З., Ланочкина М. А., Малафеева Ю. В. Структура и биологическая ценность протеина зерна сортов ярового ячменя для кормовых целей……..…11
Ерёмин Д. И., Любимова А. В. Эффективность использования агрохимикатов для ускорения разложения послеуборочных остатков яровой пшеницы в темно-серой лесной почве……..19
Захаров В. Г., Яковлева О. Д. Оценка адаптивности сортов яровой пшеницы разных периодов сортосмены методом GGE biplot анализа…….31
Каримова Л. З., Валидов Ш. З., Рахманова Г. Ф., Валиев А. Р. Ростостимулирующий эффект микроорганизмов и химических фунгицидов при комплексном применении на томатах……..39
Кузина Е. В. Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки почвы на накопление продуктивной влаги……47
Лукьянова А. А., Скосырская Д. Ю. Агробиологическая оценка группы технических сортов винограда в черноморской агроэкологической зоне Краснодарского края……..52
Маракаева Т. В. Идентификация генов пригодности к механизированной уборке среди сортообразцов чечевицы отечественной селекции……....58
Сердюк О. А. Влияние серой гнили на продуктивность растений озимых рапса и горчицы сарептской……63
Шаболкина Е. Н., Долженко Д. О., Долженко Н. Э., Анисимкина Н. В. Качество зерна сортов озимой мягкой пшеницы селекции Самарского НИИСХ в Степном Заволжье……...70

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Аюгин Н. П., Яковлев С. А., Исаев Ю. М., Калашников И. А. Разработка энергосберегающего измельчителя кормов……..77
Годжаев З. А., Сенькевич С. Е., Алексеев И. С., Майстренко Н. А., Уютов С. Ю. Экспериментальные исследования МЭС тягового класса 0,6 с автономным электроприводом……....85
Зинуров В. Э., Уткин М. О., Дмитриев А. В., Халиуллин Д. Т., Дмитриева О. С. Моделирование циркуляции теплоносителя с фазовыми переходами в замкнутом контуре для обогрева теплиц на базе высокотемпературного накопителя энергии……....93
Петров Т. И. Многокритериальная топологическая оптимизация синхронного двигателя с постоянными магнитами для сельскохозяйственной техники……100
Просвирников Д. Б., Тунцев Д. В., Гайнуллина М. К., Якимов О. А., Касанова Н. Р. Технология получения высокобелкового кормового продукта из люпина……107
Федяев В. Л., Галимов Э. Р., Ахметзянов Р. Р., Вагизов Т. Н., Пикмуллин Г. В. Оптимизация режимов обработки почвы машинно-тракторными агрегатами……..119

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Разумеев К. Э., Амерханов Х. А., Медведев А. В., Сичевой Д. В. Состояние и динамика развития секторов российского шерстяного комплекса……...130
Сафиуллин М. Р., Бурганов Р. Т., Ельшин Л. А., Абдрахманова Д. Р. Эффективность реализации программ импортозамещения в сельском хозяйстве Республики Татарстан: эмпирический анализ…..139
Суглобов А. Е., Майорова Е. А., Лясников Н. В., Абрамов Е. Г., Джикия М. К. Обеспечение фруктами и ягодами населения регионов: кластерный подход……...149
Толстова М. Л., Корнилова А. Е. Научно-технологическое сопровождение развития производственно-экономического потенциала хмелеводства в Чувашской Республике……161

CONTENTS

AGRICULTURAL SCIENCES

pages

Akmanaev E. D., Startseva A. V. Influence of biological preparations on winter triticale overwintering and grain yield in the Middle Urals……...5
Blokhin V. I., Nikiforova I. Yu., Kadyrova F. Z., Lanochkina M. A., Malafeeva Yu. V. Protein structure and biological value of spring barley grains for feed purposes……11
Eremin D. I., Lyubimova A. V. Efficiency of agrochemicals using to accelerate post-harvest residues decomposition of spring wheat in dark-gray forest soil.....19
Zakharov V. G., Yakovleva O. D. Assessment of adaptability of spring wheat varieties at different variety matching periods using GGE biplot analysis.....31
Karimova L. Z., Validov Sh. Z., Rakhmanova G. F., Valiev A. R. Growth-promoting effect of microorganisms and chemical fungicides used in combination on tomatoes……...39
Kuzina E. V. Comparative assessment of no-till and traditional tillage impact on productive moisture accumulation…….47
Lukyanova A. A., Skosyrskaya D. Yu. Agrobiological evaluation of a group of technical grape varieties in black sea agroecological zone of Krasnodar Krai.....52
Marakaeva T. V. Identification of suitability genes to mechanical harvesting among domestic lentil varieties…….58
Serdyuk O. A. Influence of gray mold on productivity of winter rape and winter mustard……..63
Shabolkina E. N., Dolzhenko D. O., Dolzhenko N. E., Anisimkina N. V. Grain quality of winter common wheat varieties breeded by Samara Research Institute in the steppe Trans-Volga region……...70

TECHNICAL SCIENCES

Ayugin N. P., Yakovlev S. A., Isaev Yu. M., Kalashnikov I. A. Development of energy-efficient feed grinder……...77
Godzhaev Z. A., Senkevich S. E., Alekseev I. S., Maystrenko N. A., Uyutov S. Yu. Experimental studies of mobile power vehicle of 0.6 traction class with an autonomous electric drive……85
Zinurov V. E., Utkin M. O., Dmitriev A. V., Khaliullin D. T., Dmitrieva O. S. Modeling the circulation of a phase-change heattransfer fluid in a closed-loop greenhouse heating system based on a high-temperature energy storage system……...93
Petrov T. I. Multi-objective topological optimization of a permanent-magnet synchronous motor for agricultural machinery……100
Prosvirnikov D. B., Tuntsev D. V., Gaynullina M. K., Yakimov O. A., Kasanova N. R. Technology for producing a high-protein feed product from lupine……107
Fedyaev V. L., Galimov E. R., Akhmetzyanov R. R., Vagizov T. N., Pikmullin G. V. Optimization of soil cultivation modes with machine-tractor units……..119

ECONOMIC SCIENCES

Razumeev K. E., Amerkhanov Kh. A., Medvedev A. V., Sichevoy D. V. Current situation and dinamics of development of sectors of Russian Federation wool industry……130
Safiullin M. R., Burganov R. T., Elshin L. A., Abdrakhmanova D. R. Effectiveness of import substitution programs in agriculture in the Republic of Tatarstan: an empirical analysis……...……..139
Suglobov A. E., Mayorova E. A., Lyasnikov N. V., Abramov E. G., Dzhikiya M. K. Fruit and berry supply to regional populations: a cluster approach…….……...149
Tolstova M. L., Kornilova A. E. Scientific and technological support for the development of production and economic potential of hop growing in the Chuvash Republic……161

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-5-10
УДК 633.19: 631.5

ВЛИЯНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НА ПЕРЕЗИМОВКУ И УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНА ОЗИМОЙ ТРИТИКАЛЕ В СРЕДНЕМ ПРЕДУРАЛЬЕ

Э. Д. Акманаев, А. В. Старцева

Реферат. В настоящей работе представлены результаты исследований, проведенных в 2022–2025 годы на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в агроклиматических условиях Пермского края, по изучению перезимовки и формирования урожайности зерна сортов озимой тритикале в зависимости от способов и сроков применения препаратов Альбит, ТПС и ЭКО-СП. Трехлетними исследованиями выявлено, что предпосевная обработка семян изучаемыми биологическими препаратами повышает их полевую всхожесть на 5–6%, перезимовку растений – на 6%. При неблагоприятных условиях эффективность обработок повышается. Двукратная обработка (семена + посевы осенью) повышает выживаемость растений озимой тритикале после зимнего периода на 9%, число продуктивных растений – на 19 шт./м^2 и густоту продуктивных стеблей – на 58 шт./м^2. В среднем за три года исследований испытуемые сорта озимой тритикале формировали сопоставимую урожайность: сорт Цекад 90 – 4,02 и сорт Сибард – 4,13 т/га зерна. Наибольшее повышение урожайности зерна получено при двухкратной обработке. На сорте Цекад 90 применение Альбит, ТПС позволило повысить урожайность на 13%, а ЭКО-СП – на 7%. Сорт Сибард в этом варианте также отреагировал существенным повышением урожайности зерна на 10% и 8% соответственно. Исследуемые препараты обеспечили сопоставимое действие на перезимовку и другие элементы структуры урожайности.

Ключевые слова: озимая тритикале, сорт, биопрепарат, Альбит, ТПС, ЭКО-СП, полевая всхожесть, перезимовка, урожайность.

Введение. Озимая тритикале – результат селекционной работы, объединивший генетические особенности пшеницы и ржи. Многофункциональность культуры определяется разнообразием сфер использования её зерна. В пищевой промышленности зерно может быть востребовано для разработки продуктов специализированного питания [1]. Кроме того, тритикале находит применение в крахмалопаточном и спиртовом производстве. Существенна и кормовая ценность зерна: для свиней это может быть базовый кормовой ресурс, для КРС, овец и бройлеров – важный элемент комбинированных кормосмесей [2, 3, 4]. Среднее Предуралье, в том числе и Пермский край, является животноводческой зоной, поэтому данная культура актуальна для региона. По данным ряда исследователей озимая тритикале обладает высоким потенциалом урожайности – до 10 т/га зерна [5, 6, 7]. Однако по официальным данным, урожайность озимой тритикале в Пермском крае составляет 1,2−1,6 т/га зерна, в благоприятные годы – до 2,7 т/га [8]. Таким образом, поиск технологических решений, которые позволили бы реализовать потенциал культуры – актуальная задача для исследований в сельском хозяйстве.

Анализ литературных источников показал, что применение препаратов биологической природы позволяет повысить продуктивность сельскохозяйственных культур [9, 10] за счёт минимизации негативного воздействия как биотических, так и абиотических стрессовых факторов [11, 12, 13]. Однако выбор эффективных методов их применения на озимой тритикале в почвенно-климатических условиях Среднего Предуралья изучен недостаточно, что и стало целью наших исследований.

Условия, материалы и методы. Закладку полевого опыта осуществляли в 2022–2024 годы, учет урожайности зерна – в 2023-2025 годы, опыт – трёхфакторный. Объектами исследований были два сорта озимой тритикале Цекад 90 (A_1) и Сибард (A_2), а также два биологических препарата: Альбит, ТПС – комплексный биопрепарат, универсальный регулятор роста растений со свойствами фунгицида и комплексного удобрения (B_1) и ЭКО СП – препарат на основе гуминовых кислот (B_2). В соответствии со схемой опыта испытывали следующие способы применения препаратов (С): 1) без обработки; 2) обработка семян; 3) двухкратная обработка: семян и листовая обработка посевов осенью; 4) листовая обработка посевов осенью; 5) двухкратная обработка: семян и листовая обработка посевов весной; 6) листовая обработка посевов весной. Экспериментальную работу, включая закладку опытов, проведение наблюдений, исследований и статистическую обработку полученных данных, выполняли по общепринятым методикам [14, 15]. Повторность в опыте четырёхкратная, размещение вариантов систематическое при учетной площади делянки третьего порядка 33 м^2. Исследования проведены на типичной для региона дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, с низким содержанием гумуса (1,98–2,57%), при обменной кислотности pH 4,70–5,32, с содержанием подвижного фосфора 181-450 мг/кг почвы и обменного калия 156-314 мг/кг почвы.

Агротехнические мероприятия в опыте соответствовали научно обоснованной зональной системе земледелия, за исключением изучаемых приёмов обработки семян и посевов [16]. Нормы расхода изучаемых препаратов соответствовали рекомендациям производителей: Альбит, ТПС применяли из расчёта 50 мл на 1 тонну семян и 1 га посевов, ЭКО-СП – 0,3 л на тонну семян и 1,2 л/га при листовой обработке посевов. Опрыскивание

посевов с расходом рабочего раствора 200 л/га проводили ранцевым опрыскивателем согласно схеме опыта.

Погодные условия в годы исследований отличались контрастностью. Осенний период 2022 и 2024 годов отличался засушливостью (ГТК=0,7…0,9), 2023 года – избыточным увлажнением (ГТК=1,9). В 2023 году ГТК за весенне-летний период составил 0,8, что характеризует его как сухой; в 2024 отмечено избыточное увлажнение при ГТК=1,5; в 2025 году избыточное увлажнение зафиксировано в первой половине весенне-летнего периода (ГТК=2,2), вторая половина характеризовалась достаточным увлажнением (ГТК=1,2).

Результаты и обсуждение. В среднем за три года полевых испытаний выявлено, что в технологии возделывания сортов озимой тритикале Сибард и Цекад 90 предпосевная обработка семян препаратами Альбит, ТПС и ЭКО-СП приводит к существенному увеличению полевой всхожести на 5–6% при значении данного показателя в варианте без применения обработки – 68% ($НСР_{05}$=3%), (табл. 1). Анализируя данные по годам исследования, можно отметить, что предпосевная обработка семян была наиболее эффективна в 2022 и 2023 годах, когда наблюдали неблагоприятные условия для их прорастания (ГТК=0,6) – в среднем повышение полевой всхожести обработанных семян составило 5-7% (контроль – 55%) и 8-9% (контроль – 71%) соответственно. В 2024 году прорастание семян сортов озимой тритикале проходило при высокой влагообеспеченности (ГТК=2,0) и полевая всхожесть в опыте варьировала от 80 до 87%, существенных отклонений между вариантами не выявлено. Таким образом, применение предпосевной обработки семян сортов озимой тритикале изучаемыми препаратами биологической происхождения оказывает положительное влияние на их полевую всхожесть особенно при стрессовых условиях в период посев–всходы.

Таблица 1- Полевая всхожесть семян сортов озимой тритикале в зависимости от способов применения биопрепаратов, %, среднее за 2022-2024 годы

Фактор А	Фактор В	Фактор С						μ АВ
		$С_1$	$С_2$	$С_3$	$С_4$	$С_5$	$С_6$	
Цекад 90	Альбит	67	74	74	67	73	66	70
	ЭКО СП	66	71	72	68	73	67	70
μ по $А_1С$		66	72	73	68	73	66	
Сибард	Альбит	70	75	74	70	74	69	72
	ЭКО СП	70	74	73	68	74	69	71
μ по $А_2С$		70	74	74	69	74	69	
μ по С		68	73	73	69	74	68	
μ по $В_1$		71	μ по $А_1$		70			
μ по $В_2$		71	μ по $А_2$		72			
НСР г. э. А		2	НСР ч. р. А		7			
В		$F_ф<F_{05}$	В		$F_ф<F_{05}$			
С		3	С		5			

Трёхлетние исследования перезимовки озимой тритикале выявили изменчивость данного показателя по годам и вариантам обработки. В 2023 году изучаемые сорта Цекад 90 и Сибард продемонстрировали выживаемость растений после зимнего периода на уровне 71% и 66% соответственно. Применение биопрепаратов для предпосевной обработки семян оказало положительное влияние, повысив выживаемость растений после зимовки на 3-5%. В 2024 году наблюдалось снижение показателей перезимовки: у сорта Цекад 90 – до 51%, у Сибарда – до 52%. Результаты дисперсионного анализа подтвердили эффективность обработки семян: в среднем она обеспечила прирост выживаемости на 5-10% относительно контрольного варианта (47%), ($НСР_{05}$=5%). В 2025 году выживаемость растений сорта Цекад 90 варьировала от 26% до 38%, сорта Сибард – от 28 до 45% в зависимости от вариантов опыта. В опытных вариантах с предпосевной обработкой семян удалось существенно увеличить выживаемость на 8-11% относительно контроля (29%) при $НСР_{05}$=4 %.

Следует отметить, что изучаемые в опыте сорта озимой тритикале Цекад 90 и Сибард характеризуются средней и высокой зимостойкостью. Низкий процент перезимовки наблюдали в 2024 и 2025 годы К зимнему периоду 2023-2024 годы растения сортов озимой тритикале подошли не в оптимальном состоянии и, хотя зима по температурному режиму была незначительно холоднее нормы, однако снежной – средняя высота снежного покрова составила 55 см. В 2025 году наблюдали теплую погоду в зимний период (среднемесячные температуры были выше нормы на 5,5-7,5°С), средняя высота снежного покрова составила 51 см. В результате наблюдали выпревание растений, их поражение снежной плесенью, что и послужило причиной гибели растений. Следует отметить, что инфекционное выпревание растений является одной из наиболее распространенных причин гибели озимых культур в Среднем Предуралье [17, 18]. Статистическая обработка данных по перезимовке за три года позволила установить преимущество предпосевной обработки семян (рис. 1). В вариантах с применением обработки семян выживаемость растений озимой тритикале достигла 53%, а при комбинированной обработке семян и посевов осенью на 3% больше,

при этом в контрольном варианте перезимовка составила 47%, (НСР05=3%). Двухкратное применение препарата Альбит, ТПС (обработка семян + обработка посевов осенью) существенно отразилось на обоих сортах озимой тритикале: на сорте Цекад 90 выживаемость повысилась на 10%, на сорте Сибард – на 13% и составила 57 и 58% соответственно при НСР05=6%.

Перезимовка растений оказывает влияние на количество продуктивных растений озимой тритикале к уборке, которые в свою очередь благодаря кустистости формируют густоту продуктивного стеблестоя – показатель, от которого в большей степени зависит величина получаемого урожая.

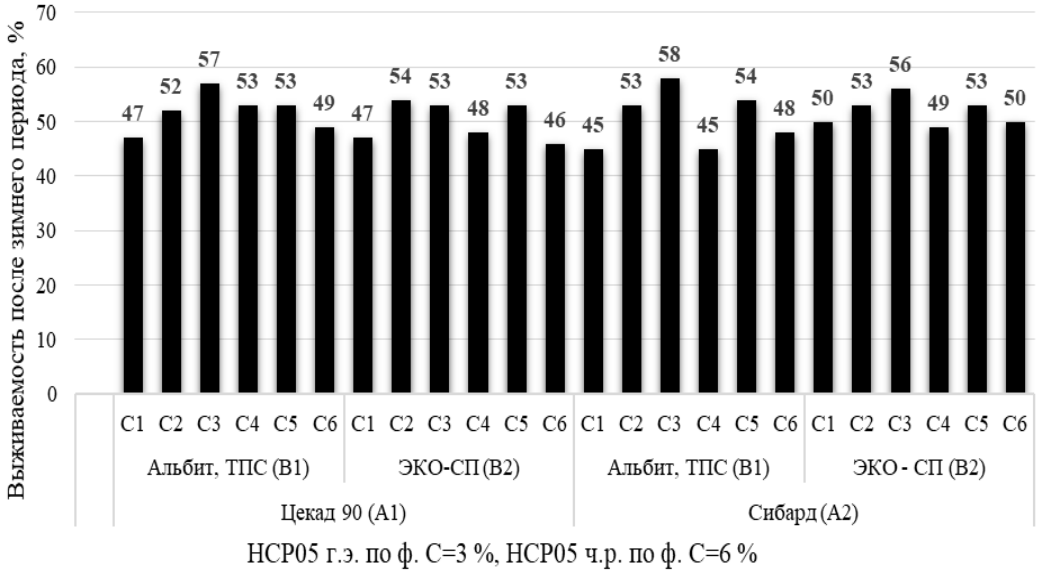


Рис. 1 - Выживаемость растений сортов озимой тритикале в зависимости от способов применения препаратов, %, среднее за 2023-2025 годы

Результаты трёхлетних наблюдений свидетельствуют о сопоставимой продуктивной густоте стояния растений у исследуемых сортов Цекад 90 и Сибард – 194 шт./м^2 и 190 шт./м^2 соответственно (табл. 2). Варианты, где проводили обработку семян перед посевом, обеспечили достоверное увеличение количества продуктивных растений до 198-201 шт./м^2 по отношению к варианту без обработки (181 шт./м^2) при $НСР_{05}$=10 шт./м^2. В проведенных исследованиях выявлено, что продуктивная кустистость культуры зависела от сортовых особенностей и агрометеорологических условий, складывающихся в период вегетации. Значение данного показателя на сорте Цекад 90 составило в среднем за три года 2,0 ед., сорта Сибард – 2,2 ед. Между сортами зафиксирована существенная разница при $НСР_{05}$=0,1 ед. В годы исследования с достаточным увлажнением в период кущения культуры продуктивная кустистость растений была выше на 1,0-1,5 ед. Влияние других изучаемых приемов на продуктивную кустистость не установлено.

Количество продуктивных стеблей в среднем за три года проведения опыта зафиксировано следующее: 366 шт./м^2 на сорте Цекад 90 и 377 шт./м^2 на сорте Сибард. В варианте без применения обработок среднее значение данного показателя составило 347 шт./м^2. Обработка семян перед посевом обеспечила повышение данного показателя на 34 шт./м^2, двукратные обработки – на 47-57 шт./м^2 относительно контроля ($НСР_{05}$=21 шт./м^2). Частные различия демонстрируют, что такой приём как предпосевная обработка семян с последующим опрыскиванием растений осенью приводит к повышению числа продуктивных стеблей при использовании препарата Альбит, ТПС на 57 шт./м^2 на сорте Цекад 90 и на 72 шт./м^{2}на сорте Сибард; при использовании ЭКО-СП увеличение составил 42 и 59 шт./м^2 соответственно при $НСР_{05}$=42 шт./м^2.

Использование биологических препаратов в технологии возделывания сортов озимой тритикале оказывало существенное влияние на повышение урожайности культуры (рис. 2). В среднем за три года исследований урожайность зерна сорта Цекад 90 составила 4,02 т/га, у сорта Сибард не существенно выше на 0,11 т/га, т.е. сорта по урожайности были сопоставимыми . Сорт Цекад 90 положительно реагировал на проведение комбинированной обработки семян и посевов осенью. Так, урожайность в этом варианте на фоне использования препарата Альбит, ТПС составила 4,22 т/га зерна, при урожайности на контроле 3,72 т/га. При применении препарата ЭКО-СП урожайность на контроле 3,92 т/га, а при комбинированной обработке больше на 0,29 т/га зерна. Следует отметить, что предпосевная обработка семян препаратом ЭКО-СП также позволяет существенно повысить сбор зерна данного сорта на 0,40 т/га.

Таблица 2 – Формирование густоты продуктивного стеблестоя сортов озимой тритикале в зависимости от способов применения препаратов, среднее за 2023-2025 годы

Фактор А	Фактор В	Фактор С	Показатели		
			Число продуктивных растений, шт./м^2	Число продуктивных стеблей, шт./м^2	Продуктивная кустистость
Цекад 90 (A_1)	Альбит, ТПС (B_1)	C_1	171	343	2,2
		C_2	208	375	2,0
		C_3	203	400	2,2
		C_4	193	361	2,0
		C_5	198	388	2,1
		C_6	187	348	2,1
	ЭКО-СП (B_2)	C_1	183	349	2,1
		C_2	199	388	2,1
		C_3	198	391	2,2
		C_4	197	344	1,8
		C_5	207	374	2,0
		C_6	183	339	2,1
Сибард (A_2)	Альбит, ТПС (B_1)	C_1	177	346	2,1
		C_2	181	380	2,3
		C_3	200	418	2,2
		C_4	175	372	2,2
		C_5	195	400	2,3
		C_6	189	370	2,1
	ЭКО-СП (B_2)	C_1	191	352	2,0
		C_2	204	380	2,0
		C_3	200	411	2,2
		C_4	173	336	2,2
		C_5	203	414	2,2
		C_6	191	347	2,1
Средние по ф. А		Цекад 90	194	366	2,0
		Сибард	190	377	2,2
Средние по ф. В		Альбит	190	375	2,2
		ЭКО-СП	194	369	2,1
Средние по ф. С		C_1	181	347	2,0
		C_2	198	381	2,2
		C_3	200	405	2,2
		C_4	184	353	2,2
		C_5	201	394	2,2
		C_6	187	351	2,1
$НСР_{05}$ г.э.		А	$F_ф < F_{05}$	$F_ф < F_{05}$	0,1
		В	$F_ф < F_{05}$	$F_ф < F_{05}$	$F_ф < F_{05}$
		С	10	21	$F_ф < F_{05}$
$НСР_{05}$ ч.р.		А	$F_ф < F_{05}$	$F_ф < F_{05}$	0,3
		В	$F_ф < F_{05}$	$F_ф < F_{05}$	$F_ф < F_{05}$
		С	19	42	$F_ф < F_{05}$

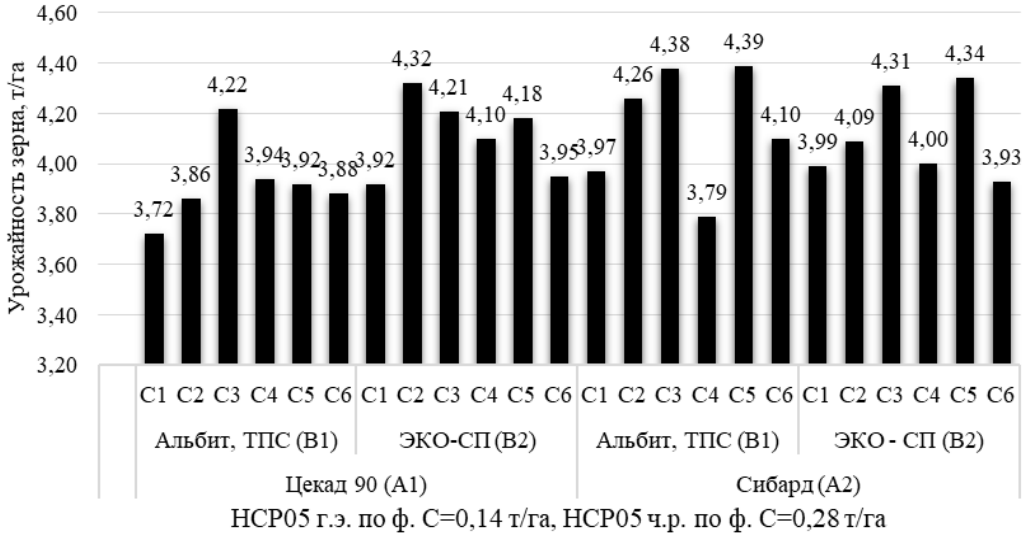


Рис. 2 - Урожайность зерна сортов озимой тритикале в зависимости от способов применения препаратов, т/га, среднее за 2023-2025 годы

Двукратные обработки семян и посевов независимо от срока опрыскивания способствуют получению наибольшей урожайности зерна сорта Сибард – 4,38-4,39 т/га при применении препарата Альбит, ТПС (на контроле – 3,97 т/га) и 4,31-4,34 т/га при применении ЭКО-СП (на контроле – 3,99 т/га) при $НСР_{05}$=0,28 т/га.

Проведенный корреляционный анализ показал существенную прямую сильную связь между урожайностью зерна сортов озимой тритикале и перезимовкой (r=0,73±0,14), а также количеством продуктивных стеблей на $м^2$ (r=0,76±0,14), связь с густотой стояния растений – прямая средняя (r=0,53±0,18), с продуктивной кустистостью – прямая слабая недостоверная (r=0,30±0,20).

Выводы. Полученные в ходе трёхлетних исследований результаты показывают, что применение в условиях Среднего Предуралья препаратов биологической природы (Альбит, ТПС и ЭКО-СП) в технологии возделывания озимой тритикале оказывает влияние на отдельные элементы структуры урожайности и в итоге на сбор зерна. Обработка семян перед посевом изучаемыми препаратами позволяет повысить их полевую всхожесть (на 5-6%) и перезимовку растений (на 6%). Двукратная обработка (семена + посевы осенью) повышает показатель выживаемости после зимнего периода на 9%, число продуктивных растений – на 19 шт./$м^2$, продуктивных стеблей – на 58 шт./$м^2$. Данный приём увеличил сбор зерна сорта Цекад 90 на 13% при применения препарата Альбит, ТПС и на 7% при применении ЭКО-СП; сорта Сибард – на 10% и 8% соответственно.

Литература

1.Гаганов А. П., Золотарев В. Н., Зверкова З. Н. Тритикале в кормлении коров // Зерновое хозяйство России. 2016. № 5. С. 16-20.

2.Грабовец А.И. Проблемы селекции и семеноводства зерновых культур и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 8. С. 10-13.

3.Майсак Г. П. Перспективы выращивания тритикале озимой в Пермском крае // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2018. № 4. С. 46- 52.

4.Mcgoverin, Cushla & Snyders, Franci & Muller, Magdalena & Botes, Willem & Fox, Glen & Manley, Marena. (2011). A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. Journal of the science of food and agriculture. 91. 1155-65. 10.1002/jsfa.4338.

5.Горянина Т.А., Горянин О.И. Урожайность и качество зерна сортов озимой тритикале в Поволжье // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 33-37.

6.Майсак Г.П., Старцева А.В. Наука - производству. Тритикале на корм и зерно // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: Сборник научных трудов. Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию ФНЦ "ВИК им. В.Р. Вильямса" (13 сентября 2022 года; Лобня). Москва: ФГБОУ ДПО "Российская академия кадрового обеспечения агропромышленного комплекса". 2023. С. 92-97.

7.Ляшков И.В., Крохмаль А.В. Агротехника возделывания новых сортов озимой тритикале в Ростовской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2024. № 2(106). С. 35-39.

8.Федеральная служба государственной статистики: сайт URL: https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277 (дата обращения 23.09.2024).

9.Шаповал О.А., Можарова И.П. Регуляторы роста растений в сельском хозяйстве // Защита и карантин растений. 2019. № 4. С. 9-14.

10.Микроэлементные удобрения, регуляторы роста, бактериальные препараты в технологии возделывания озимой тритикале в лесостепи Среднего Поволжья / П.Г. Аленин, С.А. Кшникаткин, Г.В. Ильина и др. // Нива Поволжья. 2020. № 2(55). С. 2-9.

11.Медведева И.Н., Чирков С.В., Упилкова Ж.А. Эффективность применения регуляторов роста из группы халконов против болезней яровых зерновых культур в Предуралье // Пермский аграрный вестник. 2022. № 1(37). С. 58-67.

12.Jiang, Gaoqian & Wang, Shichao & Xie, Jin & Tan, Pan & Han, Lipu. (2023). Discontinuous low temperature stress and plant growth regulators during the germination period promote roots growth in alfalfa (Medicago sativa L.). Plant Physiology and Biochemistry. 197. 10.1016/j.plaphy.2023.03.001.

13. Fard, Somayeh & Soleymani, Ali & Javanmard, Hamidreza. (2023). Plant growth regulators affecting maize leaf senescence and area index impact yield under drought. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 51. 102749. 10.1016/j.bcab.2023.102749.

14.Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Альянс, 2011. 350 с.

15. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1985. Вып.1, 2. 267 с.

16. Адаптивные технологии возделывания озимых зерновых культур в Среднем Предуралье: рекомендации / С.Л. Елисеев, Т.С. Вершинина, В.П. Мурыгин и др. ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ. Пермь: ИПЦ Прокростъ. 2017. 47 с.

17.Перезимовка и урожайность зерна озимых ржи и тритикале в зависимости от срока посева / Т.С. Вершинина, С.Л. Елисеев, В.А. Попов и др. // Пермский аграрный вестник. 2016. № 3(15). С. 11-16.

18.Туктарова Н.Г. Продуктивность и устойчивость к перезимовке сортов озимой пшеницы в условиях Удмуртской Республики // Пермский аграрный вестник. 2018. № 2(22). С. 95-100.

Сведения об авторах:

Акманаев Эльмарт Данифович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агробиотехнологий, e-mail: akmanaev@mail.ru

Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия.

Старцева Алёна Викторовна – научный сотрудник[1], аспирант кафедры агробиотехнологий[2], e-mail: frolova.al87@mail.ru
[1]Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия
[2]Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия.

INFLUENCE OF BIOLOGICAL PREPARATIONS ON WINTER TRITICALE OVERWINTERING AND GRAIN YIELD IN THE MIDDLE URALS

E. D. Akmanaev, A. V. Startseva

Abstract. This paper presents the results of research conducted in 2022-2025 on sod-podzolic heavy loamy soil in the agroclimatic conditions of Perm region, to study winter triticale overwintering and formation of grain yield depending on the methods and timing of Albit, TPS and ECO-SP preparations application. Three years research have shown that presowing seed treatment with the studied biological products increases field germination by 5-6% and overwintering survival by 6%. Effectiveness of the treatments is increased under unfavorable conditions. Double treatment (seeds + autumn sowing) increased winter triticale plant survival after winter by 9%, the number of productive plants by 19 pcs/m2 and the density of productive stems by 58 pcs/ m2. On average, over the three years of research, tested winter triticale varieties produced comparable yields: 4.02 t/ha for Tsekad 90 variety and 4.13 t/ha for Sibard variety. The greatest increase in grain yield was achieved with double treatment. Use of Albit and TPS increased yield by 13% on Tsekad 90 variety, while ECO-SP increased yield by 7%. Sibard variety also responded to this treatment with a significant increase in grain yield by 10% and 8%, respectively. The studied preparations provided comparable effects on overwintering and other elements of yield structure.

Key words: winter triticale, variety, biopreparation, Albit, TPS, ECO-SP, field germination, overwintering, yield.

References

1. Gaganov AP, Zolotarev VN, Zverkova ZN. [Triticale in cow feeding]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2016; 5. 16-20 p.
2. Grabovets AI. [Problems of breeding and seed production of grain crops and prospects for scientific and innovative support of the regional agro-industrial complex]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022; Vol.36. 8. 10-13 p.
3. Maysak GP. [Prospects for growing winter triticale in Perm region]. Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra UrO RAN. 2018; 4. 46-52 p.
4. Mcgoverin, Cushla & Snyders, Franci & Muller, Magdalena & Botes, Willem & Fox, Glen & Manley, Marena. (2011). A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. Journal of the science of food and agriculture. 91. 1155-65. 10.1002/jsfa.4338.
5. Goryanina TA, Goryanin OI. [Productivity and grain quality of winter triticale varieties in Volga region]. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2023; 10. 33-37 p.
6. Maysak GP, Startseva AV. [Science - for production. Triticale for feed and grain. Multifunctional adaptive forage production: Collection of scientific papers]. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu FNTs “VIK im. V.R. Vilyamsa” (13 sentyabrya 2022 goda; Lobnya). Moscow: FGBOU DPO Rossiyskaya akademiya kadrovogo obespecheniya agropromyshlennogo kompleksa. 2023; 92-97 p.
7. Lyashkov IV, Krokhmal AV. [Agricultural technology for cultivating new varieties of winter triticale in Rostov region]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; 2(106). 35-39 p.
8. [Internet]. Federal State Statistics Service. [cited 2024, September 23]. Available from: https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277.
9. Shapoval OA, Mozharova IP. [Plant growth regulators in agriculture]. Zashchita i karantin rasteniy. 2019; 4. 9-14 p.
10. Alenin PG, Kshnikatkin SA, Ilina GV. [Microelement fertilizers, growth regulators, bacterial preparations in the technology of winter triticale cultivation in the forest-steppe of Middle Volga region]. Niva Povolzhya. 2020; 2(55). 2-9 p.
11. Medvedeva IN, Chirkov SV, Upilkova ZhA. [Efficiency of using growth regulators from the chalcone group against diseases of spring grain crops in the middle Urals]. Permskiy agrarnyy vestnik. 2022; 1(37). 58-67 p.
12. Jiang Gaoqian & Wang, Shichao & Xie, Jin & Tan, Pan & Han, Lipu. (2023). Discontinuous low temperature stress and plant growth regulators during the germination period promote roots growth in alfalfa (Medicago sativa L.). Plant Physiology and Biochemistry. 197. 10.1016/j.plaphy.2023.03.001.
13. Fard, Somayeh & Soleymani, Ali & Javanmard, Hamidreza. (2023). Plant growth regulators affecting maize leaf senescence and area index impact yield under drought. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 51. 102749. 10.1016/j.bcab.2023.102749.
14. Dospekhov BA. Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy). [Field experiment methodology: (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Alyans. 2011; 350 p.
15. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. [State variety testing methodology of agricultural crops]. Moscow: Kolos. 1985; issue 1. 2. 267 p.
16. Eliseev SL, Vershinina TS, Murygin VP. Adaptivnye tekhnologii vozdelyvaniya ozimykh zernovykh kultur v Srednem Predurale: rekomendatsii. [Adaptive technologies for cultivating winter grain crops in the middle Urals: recommendations]. FGBOU VO Permskiy GATU. Perm: IPTs Prokrost. 2017; 47 p.
17. Vershinina TS, Eliseev SL, Popov VA. [Wintering and grain yield of winter rye and triticale depending on sowing time]. Permskiy agrarnyy vestnik. 2016; 3(15). 11-16 p.
18. Tuktarova NG. [Productivity and winter resistance of winter wheat varieties in the Udmurt Republic]. Permskiy agrarnyy vestnik. 2018; 2(22). 95-100 p.

Authors:
Akmanaev Elmart Danifovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Agrobiotechnology Department, e-mail: akmanaev@mail.ru
Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia.
Startseva Alena Viktorovna – researcher[1], post-graduate student of Agrobiotechnology Department[2], e-mail: frolova.al87@mail.ru
[1]Perm Research Institute of Agriculture – Branch of Perm Federal Research Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
[2]Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-11-18
УДК 633.16:631.524.6

СТРУКТУРА И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ПРОТЕИНА ЗЕРНА СОРТОВ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ ДЛЯ КОРМОВЫХ ЦЕЛЕЙ

В. И. Блохин, И. Ю. Никифорова, Ф. З. Кадырова, М. А. Ланочкина, Ю. В. Малафеева

Реферат. Исследования проводили с целью сравнительной оценки пленчатых сортов ярового ячменя по показателям биологической ценности протеина. Работу выполняли в 2022–2024 годы в условиях Предкамья Республики Татарстан. Методология сочетала в себе применением статистических методов с ранжированием сортов по питательной ценности для кормопроизводства. Достоверно более высокое содержание сырого протеина в сухом веществе зерна, по отношению к среднему сортовому (15,14%), зафиксировано у сортов Раушан (16,28%) и Вакула (16,46%), низкое – у сорта Финист (13,28%). Наибольшая сумма незаменимых аминокислот, по сравнению со средней сортовой (32,53 г/100 г протеина) отмечено у сортов Финист (34,66 г), Лидар (34,62 г) и Эндан (35,57 г), а наименьшая – у Фортуны (30,72 г), Нура (29,24 г), Деспины (30,59 г) и Раушана (30,82 г). Достоверно более высоким содержанием лизина, по отношению к среднему сортовому (3,93 г/100 г протеина), отличались сорта Финист (4,40 г) и Эндан (4,29 г). Выявлены первая и вторая лимитирующие аминокислоты в протеине зерна сортов ярового ячменя – лизин и треонин, средние сортовые скоры которых составили соответственно 55,6 и 59,8%. В результате ранжирования по комплексу показателей биологической ценности протеина максимальной суммой рангов (92 балла) характеризовался сорт Финист. Установлена отрицательная, достоверная на 1%-ном уровне значимости, связь между содержанием сырого протеина в зерне и лизина в протеине (r=-0,52). Полученные данные имеют практическое значение для селекции на качество и в кормопроизводстве.

Ключевые слова: яровой ячмень (*Hordeum vulgare L.*), сорт, биологическая ценность, ранжирование, сырой протеин, незаменимые аминокислоты, свиньи.

Введение. Ячмень – основная зернофуражная культура в кормлении свиней. Его доля в составе комбикормов для свиноматок может доходить до 60%, для свиней на откорме – до 80% [1]. Обусловлено это относительно высокими показателями кормовой ценности зерна ячменя. Содержание сырого протеина в зерне ярового ячменя варьирует от 12,51 до 15,01% [2, 3, 4]. По содержанию сырого протеина зерно ячменя превосходит зерно кукурузы в среднем на 1,29…2,10% [5, 6]. В. М. Голушко с соавторами [7] выявили, что концентрация «идеального» протеина в ячмене составляет 25,84 г/кг, что на 3,59 и 9,36 г/кг больше, чем в пшенице и кукурузе.

Белки злаковых культур характеризуются недостаточным количеством незаменимых аминокислот, в первую очередь – лизина. По данным Л. М. Ерошенко с соавторами [8] и L. T. Ortiz, et al. [9] содержание лизина в протеине зерна сортов ярового ячменя варьировало от 3,30 до 3,74 г/100 г белка. По величине этого показателя ячмень превышает пшеницу на 10,8, тритикале на 5,0, и кукурузу на 46,2% соответственно [10]. Исследованиями M. Rani, et al. [11] установлено средне сортовое содержание суммы незаменимых аминокислот у ячменя (32,49 г/100 г протеина). По сумме критических (лизин, треонин, метионин) и незаменимых (лизин, треонин, метионин, валин, фенилаланин, изолейцин, лейцин) аминокислот яровой ячмень превосходит яровую пшеницу соответственно на 8,9 и 12,4%, а яровое тритикале – на 28,9 и 38,7% [12].

Применение полнорационных комбикормов из зернофуража, где одним из основных компонентов выступает ячмень, при откорме свиней обеспечивает получение дополнительного прироста массы на 21,6%, снижение затрат кормов на 1 ц прироста на 12,3% и увеличение прибыли в расчёте на 1 ц прироста [13]. Рационы на основе ячменя обеспечивают лучший прирост живой массы, при этом мясо и сало свиней отличаются более благоприятным профилем жирных кислот в отношении показателей, способствующих укреплению здоровья [14]. При сравнительной характеристике рационов на основе кукурузы, гороха, конских бобов и ячменя, было установлено, что группа свиней при откорме ячменем характеризовалась самым высоким суточным приростом массы тела [15]. Частичная замена кукурузы ячменем существенно регулировала микрофлору кишечника опытных свиней [16].

Цель исследований – сравнительная оценка пленчатых сортов ярового ячменя по показателям биологической ценности протеина.

Для ее достижения решали следующие задачи: скрининг сортов ярового ячменя по комплексу показателей биологической ценности протеина; провести ранжирование сортов ярового ячменя по показателям, лимитирующим биологическую ценность протеина зерна; выявить связь между содержанием лизина в протеине с содержанием сырого протеина в зерне.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2022–2024 году в отделе аналитических исследований и на опытных полях Татарского НИИСХ. Почва опытного участка серая лесная, среднесуглинистая, в пахотном слое (0…22 см) характеризовалась следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса – 3,52% (ГОСТ 26213-91), азота щёлочно-гидролизуемого – 7,9 мг/100 г (по А.Х. Корнфилду), подвижного фосфора – 25,7 мг/100 г, подвижного калия – 12,6 мг/100 г (по методу Кирсанова в модификации

ЦИНАО, ГОСТ 26207-91); гидролитическая кислотность – 4,5 ммоль/100 г (по методу Каппена в модификации ЦИНАО, ГОСТ 26212-91); pH солевой вытяжки – 5,9 ед. Предшественником служила озимая рожь. Использовали минеральные удобрения в дозе $N_{54}P_{52}K_{52}S_{20}$. Объект исследования – зерно 15 пленчатых сортов ярового ячменя, допущенных к возделыванию по Республике Татарстан (табл. 1).

Таблица 1 – Сорта ярового ячменя и учреждения-оригинаторы

Сорт	Учреждение-оригинатор
Раушан	ФГБНУ «ФИЦ Немчиновка»; ФГБНУ «ФИЦ Казанский НЦ РАН»; НПФ «Российские семена»
Лаишевский, Тимерхан, Эндан, Камашевский, Тевкеч	ФГБНУ «ФИЦ Казанский НЦ РАН»
Фандага, Деспина	NORDSAAT SAATZUCHT GMBH, Германия
Памяти Чепелева	Уральский ФАНИЦ УрО РАН
Нур	ФГБНУ «ФИЦ Немчиновка»
Финист	ФГБНУ «Самарский ФИЦ РАН»; ФГБНУ «ФНЦ лубяных культур»; ФГБОУ ВО «Самарская ГСХА»
Фортуна	ACKERMANN SAATZUCHT GMBH & CO. KG
Надежный	ФГБНУ «ФИЦ «Немчиновка»; ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
Лидар	ООО «Агрокомпания Л и З»
Вакула	ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ»; «Селекционно-генетический институт-Национальный центр семеноведения и сортоизучения»; ООО АПК «Александровское»; ЗАО Агрофирма «Павловская Нива»

Количество сырого протеина в зерне определяли по ГОСТ 13496.4-2019 с использованием титриметрического метода по Къельдалю (комплект лабораторного оборудования для определения азота и белка, полуавтомат Velp Scientifica, Италия). Содержание 10 незаменимых аминокислот измеряли с использованием спектроскопии в ближней инфракрасной области на приборе FOOS NIRS DS 2500, Дания. Валидация и градуировка соответствуют ГОСТ ISO 12099-2017.

При определении биологической ценности протеина ориентировались на показатели содержания незаменимых аминокислот в идеальном протеине для свиней, приведенные В.Г. Рядчиковым [17]. Рассчитывали семь показателей: аминокислотный скор (АС, %); индекс незаменимых аминокислот (ИНАК, доли ед.); обобщенный коэффициент утилитарности (U, доли ед.); коэффициент сопоставимой избыточности (G); коэффициент различия аминокислотных скоров (КРАС, %), биологическая ценность белка (БЦ, %); показатель Карпаци-Линдера-Варги (%). Их определяли по формулам, приведёнными Н.Ф. Мазаловой [18].

Аминокислотный скор (АС, %) – один из методов определения качества протеина, путем сравнения аминокислоты в исследуемом продукте с «идеальным» протеином. Аминокислота, скор которой имеет самое низкое значение называется первой лимитирующей аминокислотой. Значение скора этой аминокислоты определяет биологическую ценность и степень усвоения протеина. Для «идеального» протеина (АС=100%).

Индекс незаменимых аминокислот (ИНАК, доли единицы) учитывает количество всех незаменимых аминокислот. Для «идеального» протеина индекс незаменимых аминокислот (ИНАК =1).

Обобщённый коэффициент утилитарности аминокислотного состава протеина (U, доли ед.) численно характеризует степень сбалансированности незаменимых аминокислот по отношению к физиологически необходимой норме. Для «идеального» протеина обобщённый коэффициент утилитарности (U=1).

Коэффициент сопоставимой избыточности (G) отражает общее количество незаменимых аминокислот, которое не может быть утилизировано из-за взаимной несбалансированности состава по отношению к эталону. Для «идеального» протеина коэффициент сопоставимой избыточности (G=0).

Коэффициент различия аминокислотных скоров (КРАС, %) указывает на избыточное количество незаменимых аминокислот, не используемых на пластические нужды. По величине коэффициента различия аминокислотных скоров оценивают биологическую ценность протеина (БЦ=100-КРАС, %). Чем выше коэффициент различия аминокислотных скоров, тем ниже биологическая ценность белка. Для «идеального» протеина коэффициент различия аминокислотных скоров (КРАС=0%), а биологическая ценность (БЦ=100%).

Показатель Карпаци-Линдера-Варги различает протеин на «хороший» и «идеальный». Для «идеального» протеина он равен 100%.

Ранжирование сортов по комплексу показателей биологической ценности протеина проводили в порядке убывания. Максимальный ранг присваивали сорту с наиболее высоким показателем биологической ценности. То есть лучший сорт характеризовался максимальной суммой баллов.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программы «Agros», версия 2006.

Результаты и обсуждение. Генеральная средняя содержания протеина в зерне сортов ярового ячменя с вероятностью 95% располагалась в интервале 14,66…15,62% на сухое вещество (табл. 2). Достоверно самое высокое в опыте содержание протеина, по отношению к среднему сортовому (15,14% на сухое вещество) зафиксировано у сортов Раушан (16,28%) и Вакула (16,46%), достоверно самое низкое – у Финиста (13,28%).

С вероятностью 95% генеральная средняя суммы аминокислот в протеине зерна сортов ярового ячменя располагалась в интервале 31,52…33,54 г/100 протеина. Достоверно более высокие суммы аминокислот, по отношению к средней сортовой (32,53 г/100 г протеина), зафиксированы у сортов Финист (34,66 г), Лидар (34,62 г) и Эндан (35,57 г), достоверно самые низкие – у Фортуны (30,72 г), Нура (29,24 г), Деспины (30,59 г) и Раушана (30,82 г).

С вероятностью 95% генеральная средняя содержания лизина в протеине зерна сортов ярового ячменя располагалась в интервале 3,81…4,06 г/100 г протеина. Достоверно более высокие величины этого показателя, по отношению к среднему сортовому (3,93 г), отмечено у сортов Финист (4,40 г) и Эндан (4,29 г), достоверно самые низкие – у Нура (3,55 г) и Раушана (3,65 г).

Таблица 2 – Содержание сырого протеина, лизина и суммы незаменимых аминокислот в зерне сортов ярового ячменя (2022–2024 годы)

Сорт	Содержание, г/100 г протеина		СП, % на СВ*
	Lys	сумма НАК**	
Идеальный протеин	7,1	40,1	
Финист	4,40	34,66	13,28
Фортуна	3,87	30,72	14,69
Нур	3,55	29,24	15,25
Тимерхан	4,02	33,95	15,41
Надежный	4,06	33,06	14,69
Лидар	3,98	34,62	14,42
Памяти Чепелева	3,86	32,80	15,75
Деспина	3,77	30,59	15,94
Лаишевский	3,91	32,44	15,41
Камашевский	4,04	32,70	15,75
Раушан	3,65	30,82	16,28
Вакула	3,82	32,18	16,46
Эндан	4,29	35,57	14,35
Тевкеч	4,05	33,82	15,22
Фандага	3,74	30,78	14,19
X ± Sx	3,93 ± 0,06	32,53 ± 0,47	15,14 ± 0,22
95% доверительный интервал	3,81…4,06	31,52…33,54	14,66…15,62
F-критерий Фишера	6,89	11,57	9,68
$НСР_{05}$	0,26	1,61	0,84

**СП – сырой протеин; СВ – сухое вещество*
*** – сумма незаменимых аминокислот (НАК)*

Следует отметить относительно высокое среднее сортовое содержание в протеине аргинина (4,55 г/100 г протеина), в сравнении с эталонным показателем (2,8 г/100 г протеина).

Девять из десяти незаменимых аминокислот выступают лимитирующими (скор<100%). По данным М. О. Омарова с соавторами [19], первой и второй лимитирующими аминокислотами в протеине зерна ярового ячменя служат лизин и треонин. В наших исследованиях установлена аналогичная картина, их средние сортовые скоры составляли соответственно 55,6 и 59,8% соответственно, третьей лимитирующей аминокислотой в протеине зерна был гистидин (63,9%), четвертой – изолейцин (72,1%), пятой – триптофан (84,1%), шестой – лейцин (85,3%), седьмой – метионин (86,5%), восьмой – валин (87,1%), девятой – фенилаланин (95,0%).

Таблица 3 – Скоры незаменимых аминокислот в белке зерна сортов ячменя относительно идеального протеина (среднее за 2022–2024 годы), %

Сорт	Lys	Thr	His	Ile	Trp	Leu	Met	Val	Phe	Arg
Идеальный протеин	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Финист	62,0	63,0	69,7	73,0	81,1	90,5	92,9	92,0	102,1	174,8
Фортуна	54,5	58,7	64,5	66,4	73,0	79,7	82,5	82,9	90,6	152,4
Нур	49,9	53,9	56,3	62,6	70,6	77,9	81,9	77,6	83,4	148,2
Тимерхан	56,6	63,0	65,4	74,4	81,0	87,7	92,7	90,9	89,6	178,4
Надежный	57,1	61,1	64,8	73,0	78,7	85,9	90,5	89,8	95,5	164,4
Лидар	56,0	63,0	65,9	77,1	94,4	90,1	88,9	95,3	103,9	175,3
Памяти Чепелева	54,4	59,1	61,8	72,9	81,7	87,5	91,9	88,1	95,9	163,9
Деспина	53,1	57,1	64,4	69,2	85,4	78,3	79,1	79,9	89,0	150,4
Лаишевский	55,1	59,3	61,2	72,4	91,4	87,1	82,6	85,3	95,8	159,0
Камашевский	56,9	58,4	61,9	72,9	85,6	88,4	82,7	86,1	95,7	162,4
Раушан	51,4	55,8	61,4	69,9	88,3	79,2	82,9	80,8	91,2	155,2
Вакула	53,8	58,6	65,1	72,8	87,5	84,6	84,9	85,9	94,8	157,5
Эндан	60,4	66,1	68,2	79,8	86,5	94,8	86,4	93,2	104,9	183,9
Тевкеч	58,6	61,9	65,2	79,2	92,1	91,4	97,3	93,1	102,2	168,3
Фандага	52,6	58,3	60,1	66,2	84,1	79,3	80,5	85,7	90,1	149,8
X ± Sx	55,6 ± 0,8	59,8 ± 0,8	63,9 ± 0,9	72,1 ± 1,2	84,1 ± 1,7	85,3 ± 1,5	86,5 ± 1,4	87,1 ± 1,4	95,0 ± 1,6	162,9 ± 2,9
№№ лимитирующей аминокислоты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-

Аналогично абсолютным значениям содержания в белке следует отметить высокий средний сортовой скор аргинина (162,9%), в сравнении с другими незаменимыми аминокислотами. Это согласуется с данными Н. С.-А. Ниязова [1], согласно которым скор аргинина в протеине зерна ярового ячменя достигал 167,5%.

Таблица 4 – Ранжирование сортов ярового ячменя по показателям биологической ценности протеина* (среднее за 2022–2024 годы)

Сорт	скор Lys, %	ИНАК, доли. ед.	U, доли. ед.	G	КРАС, %	БЦ, %	Покаатель Карпаци-Линдера-Варги, %	Сумма рангов, балл
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Идеальный протеин	100	1	1	0	0	100	100	
Финист	62,0 15	0,52 14	0,70 14	16,46 14	28,77 10	71,23 10	80,73 15	92
Фортуна	54,5 7	0,27 2	0,71 15	16,27 15	25,73 15	74,27 15	77,54 7	76
Надежный	57,1 12	0,39 10	0,69 11	17,77 11	28,97 9	71,03 9	78,83 13	75
Камашевский	56,9 11	0,35 7	0,69 12	17,57 12	28,33 11	71,67 11	78,65 11	75
Деспина	53,1 4	0,31 5	0,69 13	17,44 13	27,47 13	72,53 13	76,87 4	65
Эндан	60,4 14	0,53 15	0,67 7	19,04 8	32,03 2	67,97 2	80,45 14	62
Нур	49,9 1	0,20 1	0,68 9	18,53 10	26,27 14	73,73 14	75,31 1	50
Тимерхан	56,6 10	0,43 11	0,66 3	19,90 5	31,36 5	68,64 5	78,58 10	49
Лаишевский	55,1 8	0,36 9	0,68 8	18,79 9	29,83 8	70,17 8	77,84 8	58
Тевкеч	58,6 13	0,45 12	0,67 6	19,31 7	31,78 3	68,22 3	78,76 12	56
Фандага	52,6 3	0,30 4	0,68 10	24,12 1	28,01 12	71,99 12	76,62 3	45

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вакула	53,8 5	0,35 6	0,67 5	19,68 6	30,73 6	69,27 6	77,21 5	39
Лидар	56,0 9	0,50 13	0,64 1	21,69 2	34,96 1	65,04 1	78,29 9	36
Памяти Чепелева	54,4 6	0,36 8	0,66 12	20,65 3	31,54 4	68,46 4	77,37 6	33
Раушан	51,4 2	0,29 3	0,66 4	19,91 4	30,22 7	69,78 7	76,00 2	29
X ± Sx	55,6 ± 0,8	0,37 ± 0,03	0,68 ± 0,01	19,14 ± 0,53	29,73 ± 0,63	70,27 ± 0,36	77,94 ± 0,39	
95% доверительный интервал	53,6-57,2	0,32-0,43	0,67-0,69	18,01-20,28	28,38-31,09	68,91-71,62	77,11-78,76	
F-критерий Фишера	15,81	5,61	9,84	16,76	9,07	9,07	4,47	
НСР $_{05}$	2,5	0,12	0,02	1,50	2,4	2,4	2,13	

** – В числителе абсолютные значения показателей, в знаменателе – ранг сорта*

С вероятностью 95% генеральная средняя скора лизина в протеине зерна сортов ярового ячменя располагалась в интервале 53,6…57,2%. Достоверно более высокие величины этого показателя, по отношению к средней сортовой (55,6%), зафиксированы у сортов Финист (62,0%), Эндан (60,4%) и Тевкеч (58,6%).

Генеральная средняя индекса незаменимых аминокислот (ИНАК) протеина зерна изученных сортов с вероятностью 95% находилась в интервале 0,32…0,43 доли ед. Достоверно более высоким, по отношению к среднему сортовому (0,37 доли ед.), он был у сортов Финист (0,50), Лидар (0,50) и Эндан (0,53).

С вероятностью 95% генеральная средняя обобщённого коэффициента утилитарности аминокислотного состава протеина (U, доли ед.) зерна сортов ярового ячменя располагалась в интервале 0,671…0,691. Достоверно более высокими величинами этого показателя, по отношению к средней сортовой (0,682 доли ед.), отличались сортов Финист (0,709) и Фортуна (0,711).

Генеральная средняя коэффициента сопоставимой избыточности аминокислотного состава протеина (G) зерна с вероятностью 95% располагалась в интервале 18,01…20,28. Достоверно более низким по отношению к среднему сортовому (19,14) он был у сортов Финист (16,46), Фортуна (16,27), Деспина (17,44) и Камашевский (17,57).

С вероятностью 95% генеральная средняя коэффициента различия аминокислотных скоров (КРАС, %) располагалась в интервале 28,37…31,09%. Достоверно более низки величины этого показателя, по отношению к средней сортовой (29,73%), отмечены у сортов Фортуна (25,73%) и Нур (26,27%), что свидетельствует о повышенной биологической ценности их протеина (БЦ, %). Достоверно более высокой биологической ценностью протеина зерна по отношению к средней сортовой (70,26%) отличались сорта Фортуна (74,27%) и Нур (73,73%).

Генеральная средняя показателя Карпаци-Линдера-Варги с вероятностью 95% располагалась в интервале 77,11…78,76. Достоверно более высокие его величины, по отношению к средней сортовой (77,94%), зафиксированы у сортов Финист (80,73%) и Эндан (80,45%).

Максимальной в опыте суммой рангов (92 балла) характеризовался у сорта Финист, минимальной (29 баллов) – сорт Раушан.

Установлена отрицательная связь между содержанием протеина в зерне и содержанием лизина в протеине зерна сортов ярового ячменя (r = -0,53; t факт. = 3,17> t теор. = 2,02). То есть, сорта с более высоким содержание протеина в зерне, отличались меньшими значениями содержания лизина в протеине. Аналогичные данные приведены в исследованиях Biel W., Jacyno E. [20] и Jarmo Valaja, et al. [21].

Выводы. Установлена значительная межсортовая вариабельность зерна ярового ячменя по показателям биологической ценности протеина. По содержанию сырого протеина в зерне достоверно превзошли средний уровень по опыту сорта Раушан и Вакула, уступив при этом большинству сортов по качественному составу протеина. Наибольшая в опыте сумма незаменимых аминокислот, в том числе лимитирующих сбалансированность протеина по лизину и треонину, отмечена у сортов Финист и Эндан.

Достоверно более высокие скоры лизина, по отношению к среднему сортовому значению (55,6%), зафиксированы у сортов Финист (62,0%), Эндан (60,4%) и Тевкеч (58,6%).

По комплексу показателей биологической ценности протеина максимальным в

исследовании значением суммы рангов (92 балла) характеризовался сорт Финист, что свидетельствует о высокой биологической ценности протеина его зерна.

У изученных сортов ярового ячменя выявлена отрицательная связь между содержанием протеина в зерне и лизина (r=-0,53).

Сведения о финансировании. Работа выполнена по государственному заданию «Совершенствование комплексных отечественных технологий селекции, растениеводства и животноводства на основе идентификации высокоценных генотипов, молекулярно-генетических методов, биотехнологий, конструирования адаптивных и высокопродуктивных агробиоценозов и агроэкосистем для производства экологически безопасной и функциональной продукции» ЕГИСУ НИОКР 125031003428-9.

Литература

1. Ниязов Н. С.-А. Истинная переваримость аминокислот ячменя // Животноводство России. 2022. № 5. С. 23–24. doi: 10.25701/ZZR.2022.05.05.012.

2. Питательная ценность зерна сортообразцов ярового ячменя селекции Татарского НИИСХ / В. И. Блохин, И. Ю. Никифорова, И. С. Ганиева и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 4 (64). С. 5–9: doi: 10.12737/2073-0462-2022-5-9.

3. Левакова О. В., Ерошенко Л. М. Высокобелковые сорта и перспективные линии ярового ячменя // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 6. С. 23–25. doi: 10.30850/vrsn/2019/6/23-25.

4. Оценка образцов ячменя на содержание β-глюканов в зерне и другие ценные признаки в условиях Восточной Сибири / В. И. Полонский, Н. А. Сурин, С. А. Герасимов и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021. Т. 182. № 1. С. 48–58. doi: 10.30901/2227-8834-2021-1-48-58.

5. Определение аминокислотного профиля кормов, используемых на МРТ Краснодарского края / В. Г. Рядчиков, В. Х. Вороков, О. Г. Шляхова и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 163. С. 192–212.

6. Протеиновая и аминокислотная питательность кормов для свиней / В. М. Голушко, А. В. Голушко, В. Н. Пилюк и др. // Весцi нацыянальнай акадэмii навук Беларусi. Серыя аграрных навук. 2016. № 3. С. 81–88.

7. Основные виды корма для свиней / В.М. Голушко, А.В. Голушко, В.А. Рощин и др. // Животноводство России. 2017. № 11. С. 23–25.

8. Оценка качественных показателей зерна сортов и линий ярового ячменя / Л. М. Ерошенко, М. М. Ромахин, А. Н. Ерошенко и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. Т. 20. № 2. С. 126–133. doi: 10.30766/2072-9081.2019.20.2.126-133.

9. Changes in the nutrient composition of barley grain (Hordeum vulgare L.) and of morphological fractions of sprouts / L. T. Ortiz, S. Velasco, J. Trevino, et al. // Scientifica. 2021. 7 p. URL: https://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC8321752&blobtype=pdf. (дата обращения: 15.07.24). doi: 10.1155/2021/9968864.

10. Ниязов Н. С.-А. Кажущаяся и истинная илеальная доступность аминокислот зерна злаковых кормов у растущих свиней // Проблемы биологии продуктивных животных. 2021. № 1. С. 101–111. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.1.101-111.

11. Comparative quality evaluation of physicochemical, technological, and protein profiling of wheat, rye, and barley cereals / M. Rani, G. Singh, R. A. Siddiqi, et al. // Frontiers in Nutrition. 2021. Vol. 8. URL: https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2021.694679/full (дата обращения: 15.07.24). doi: 10.3389/fnut.2021.694679.

12. Маркевич Д. В., Путятин Ю. В., Таврыкина О. М. Сравнительный анализ состава незаменимых аминокислот в основной продукции зерновых культур // Почвоведение и агрохимия. 2013. № 1 (50). С. 178–188.

13. Попков Н. А., Голушко В. М., Козинец А. И. К стратегии развития комбикормовой отрасли Беларуси // Зоотехническая наука Беларуси. 2020. Т. 55. № 1. С. 3–16.

14. Barley, Triticale, of Rye? The type of grain can affect the growth performance and meat quality of sustainable raised pigs / E. R. Grela, E. Kowalczuk-Vasilev, M. Świątkiewicz, et al. // Animals (Basel). 2023. Vol. 13. No. 8. 15 p. URL: https://www.mdpi.com/2076-2615/13/8/1331 (дата обращения: 15.07.24). doi: 10.3390/ani13081331.

15. Different carbohydrate sources affect swine performance and post-prandial glycemic response / P. Lombardi, N. Musco, S. Calabrò, et al. // Italian Journal of Animal Science. 2020. Vol. 19. No. 1. P. 421–430. doi: 10.1080/1828051x.2020.1749899.

16. Ma X., Li Z., Zhang Yu. Effects of the partial substitution of corn with wheat or barley on the growth performance, blood antioxidant capacity, intestinal health and fecal microbial composition of growing pigs // Antioxidants (Basel). 2022. Vol. 11. No. 8. 13 p. URL: https://www.mdpi.com/2076-3921/11/8/1614 (дата обращения: 15.07.24). doi: 10.3390/antiox11081614.

17. Рядчиков В. Г. Нормы потребности свиней мясных пород и кроссов в энергии и переваримых аминокислотах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 34. С. 188–216.

18. Мазалова Н. Ф. Пищевая химия, практикум. Керчь. 2020. С. 19–20

19. Омаров М. О., Слесарёва О. А., Османова С. О. Определение доступности аминокислот зерна злаков для всасывания в кишечнике у молодняка свиней // Проблемы биологии продуктивных животных. 2016. № 3. С. 82–90.

20. Biel W., Jacyno E. Chemical composition and nutritive value of spring hulled barley varieties // Bulgarian journal of agricultural science. 2013. Vol. 19. No. 4. P. 721–727.

21. Valaja J., Suomi K., Alaviuhkola T. Effects of variety, soil type and nitrogen fertilizer supply on the nutritive value of barley for growing pigs // Agricultural and Food Science. 1997. Vol. 6. No. 4. P. 295–303. doi: 10.23986/afsci.72792. (дата обращения: 15.07.24)

Сведения об авторах:

Блохин Василий Иванович – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции ярового ячменя, e-mail: bvikazan@bk.ru

Никифорова Ирина Юрьевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории селекции ярового ячменя, e-mail: irina220169@mail.ru
Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.
Кадырова Фануся Загитовна – доктор сельскохозяйственных наук, чл.-корр. АН РТ, профессор кафедры общего земледелия, защиты растений и селекции, e-mail: fanusa51@rambler.ru
Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.
Ланочкина Марина Александровна – научный сотрудник лаборатории селекции ярового ячменя, e-mail: lmar2701@mail.ru
Малафеева Юлия Викторовна – научный сотрудник лаборатории селекции ярового ячменя, e-mail: malxp@mail.ru
Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.

PROTEIN STRUCTURE AND BIOLOGICAL VALUE OF SPRING BARLEY GRAINS FOR FEED PURPOSES

V. I. Blokhin, I. Yu. Nikiforova, F. Z. Kadyrova, M. A. Lanochkina, Yu. V. Malafeeva

Abstract. The study was conducted to comparatively evaluate hulled spring barley varieties for protein biological value. The work was carried out from 2022 to 2024 in Kama region of the Republic of Tatarstan. Methodology combined statistical methods with ranking of varieties based on their nutritional value for feed production. Significantly high values of crude protein content in the dry matter of grain relative to the average varietal value of 15.14% were recorded in Raushan (16.28%) and Vakula (16.46%) varieties, a low one was in Finist variety (13.28%). The highest amount of essential amino acids, in comparison with the varietal average (32.53 g/100 g protein), was noted in Finist (34.66 g), Lidar (34.62 g) and Endan (35.57 g) varieties, and the lowest - in Fortuna (30.72 g), Nur (29.24 g), Despina (30.59 g) and Raushan (30.82 g). Finist (4.40 g) and Endan (4.29 g) varieties had significantly higher lysine content than the varietal average (3.93 g/100 g protein). The first and second limiting amino acids in the grain protein of spring barley varieties – lysine and threonine – were identified, with average varietal scores of 55.6 and 59.8%, respectively. As a result of ranking based on a set of protein biological value indicators revealed that Finist variety had the highest rank sum (92 points). A negative relationship was established between the content of crude protein in grain and the content of lysine in protein (r=-0.52), which was reliable at the 1% significance level. Data obtained have practical implications for quality breeding and forage production.

Key words: spring barley *(Hordeum vulgare L.),* variety, biological value, ranking, crude protein, essential amino acids, pigs.

Reference

1. Niyazov NSA. [True digestibility of barley amino acids] Zhivotnovodstvo Rossii. 2022; 5. 23-24 p. doi: 10.25701/ZZR.2022.05.05.012.
2. Blokhin VI, Nikiforova IYu, Ganieva IS. [Nutritional value of spring barley grain samples bred by Tatar Research Institute of Agriculture]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 4 (64). 5-9 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-5-9.
3. Levakova OV, Eroshenko LM. [High-protein varieties and promising lines of spring barley]. Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki. 2019; 6. 23-25 p. doi: 10.30850/vrsn/2019/6/23-25.
4. Polonskiy VI, Surin NA, Gerasimov SA. [Evaluation of barley samples for the content of β-glucans in grain and other valuable traits in Eastern Siberia]. Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2021; Vol.182. 1. 48-58 p. doi: 10.30901/2227-8834-2021-1-48-58.
5. Ryadchikov VG, Vorokov VKh, Shlyakhova OG. [Determination of amino acid profile of feed used at MRT of Krasnodar Krai]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; 163. 192-212 p.
6. Golushko VM, Golushko AV, Pilyuk VN. [Protein and amino acid nutritional value of pig feed]. Vestsi natsyyanalnai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk. 2016; 3. 81-88 p.
7. Golushko VM, Golushko AV, Roshchin VA. [Main types of feed for pigs]. Zhivotnovodstvo Rossii. 2017; 11. 23-25 p.
8. Eroshenko LM, Romakhin MM, Eroshenko AN. [Evaluation of quality indicators of grain of spring barley varieties and lines]. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2019; Vol.20. 2. 126-133 p. doi: 10.30766/2072-9081.2019.20.2.126-133.
9. Ortiz LT, Velasco S, Trevino J. Changes in the nutrient composition of barley grain *(Hordeum vulgare L.)* and of morphological fractions of sprouts. [Internet]. Scientifica. 2021; 7 p. [cited 2024, July 15]. Available from: https://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC8321752&blobtype=pdf. doi: 10.1155/2021/9968864.
10. Niyazov NSA. [Apparent and true ileal availability of amino acids in cereal feed grains in growing pigs]. Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh. 2021; 1. 101-111 p. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2021.1.101-111.
11. Rani M, Singh G, Siddiqi RA. Comparative quality evaluation of physicochemical, technological, and protein profiling of wheat, rye, and barley cereals. [Internet]. Frontiers in Nutrition. 2021; Vol.8. [cited 2024, July 15]. Available from: https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2021.694679/full. doi: 10.3389/fnut.2021.694679.
12. Markevich DV, Putyatin YuV, Tavrykina OM. [Comparative analysis of the composition of essential amino acids in the main products of grain crops]. Pochvovedenie i agrokhimiya. 2013; 1 (50). 178-188 p.
13. Popkov NA, Golushko VM, Kozinets AI. [To a strategy of compound feed industry development in Belarus]. Zootekhnicheskaya nauka Belarusi. 2020; Vol.55. 1. 3-16 p.
14. Grela ER, Kowalczuk-Vasilev E, Swiatkiewicz M. Barley, Triticale of Rye? The type of grain can affect the growth performance and meat quality of sustainable raised pigs. [Internet]. Animals (Basel). 2023; Vol.13. No.8. 15 p. [cited 2024, July 15]. Available from: https://www.mdpi.com/2076-2615/13/8/1331. doi: 10.3390/ani13081331.
15. Lombardi P, Musco N, Calabro S. Different carbohydrate sources affect swine performance and post-prandial glycemic response. Italian Journal of Animal Science. 2020; Vol.19. No.1. 421-430 p. doi: 10.1080/1828051x.2020.1749899.

16. Ma X, Li Z, Zhang Yu. Effects of the partial substitution of corn with wheat or barley on the growth performance, blood antioxidant capacity, intestinal health and fecal microbial composition of growing pigs. [Internet]. Antioxidants (Basel). 2022; Vol.11. No.8. 13 p. [cited 2024, July 15]. Available from: https://www.mdpi.com/2076-3921/11/8/1614. doi: 10.3390/antiox11081614.

17. Ryadchikov VG. [Standards of requirements of meat breeds and crosses of pigs for energy and digestible amino acids]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2007; 34. 188-216 p.

18. Mazalova NF. Pishchevaya khimiya, praktikum. [Food chemistry, practical course]. Kerch. 2020; 19-20 p.

19. Omarov MO, Slesareva OA, Osmanova SO. [Determination of the availability of amino acids of cereal grain for intestinal absorption of young pigs]. Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh. 2016; 3. 82-90 p.

20. Biel W, Jacyno E. Chemical composition and nutritive value of spring hulled barley varieties. Bulgarian journal of agricultural science. 2013; Vol.19. No.4. 721-727 p.

21. Valaja J, Suomi K, Alaviuhkola T. Effects of variety, soil type and nitrogen fertilizer supply on the nutritive value of barley for growing pigs. [Internet]. Agricultural and Food Science. 1997; Vol.6. No.4. 295-303 p. [cited 2024, July 15]. Available from doi: 10.23986/afsci.72792.

Authors:

Blokhin Vasiliy Ivanovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher of Spring Barley Breeding Laboratory, e-mail: bvikazan@bk.ru

Nikiforova Irina Yurevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Spring Barley Breeding Laboratory, e-mail: irina220169@mail.ru

Tatar Research Institute of Agriculture – a separate structural subdivision of Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.

Kadyrova Fanusya Zagitovna – Doctor of Agricultural Sciences, corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Professor of General Farming, Plant Protection and Breeding Department, e-mail: fanusa51@rambler.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.

Lanochkina Marina Aleksandrovna – researcher of Spring Barley Breeding Laboratory, e-mail: lmar2701@mail.ru

Malafeeva Yuliya Viktorovna – researcher of Spring Barley Breeding Laboratory, e-mail: malxp@mail.ru

Tatar Research Institute of Agriculture – a separate structural subdivision of Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-19-30
УДК 631.81:631.872:631.445.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АГРОХИМИКАТОВ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ПОСЛЕУБОРОЧНЫХ ОСТАТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ТЕМНО-СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

Д. И. Ерёмин, А. В. Любимова

Реферат. Исследования проводили с целью определения эффективности агрохимикатов, используемых для ускорения разложения послеуборочных остатков яровой пшеницы в темно-серой лесной почве. Работу выполняли в 2023–2024 годы в модельном опыте методом компостирования пахотной темно-серой лесной почвы. Схема опыта предусматривала компостирование соломы яровой пшеницы в течение 12 мес. при оптимальных для развития почвенной микробиоты условиях (температура +20…22°С; влажность почвы 60…70% от предельно-полевой влагоемкости) с добавлением различных агрохимикатов. Через 1, 2, 3, 6, 9 и 12 мес. солому извлекали и определяли массу неминерализованного остатка, содержание органического углерода, общего азота. Для изучения направленности процесса разложения послеуборочных остатков в почве определяли активность инвертазы, полифенолоксидазы и пероксидазы. При отсутствии агрохимикатов солома яровой пшеницы в темно-серой лесной почве за 2 мес. компостирования не претерпевает существенных изменений. Достоверная ее трансформация происходит в период с 3 по 12 мес. экспозиции. Через год компостирования убыль массы составила 52% от исходной; соотношение углерода к азоту уменьшилось с 79 до 40. Коэффициент гумификации на протяжении всего опыта был равен 1,1…1,2, что указывает на создание оптимальных условий для гумификации соломы в темно-серой лесной почве. Обработка соломы карбамидо-аммонийной смесью, гуминовым препаратом Росток, Микробионик деструктор стерни, Биокомпозит корректор ускоряет процесс разложения соломы яровой пшеницы. Максимальный эффект в опыте отмечен при совместном использовании КАС 32, гуминового препарата и одного из биодеструкторов. Через 12 мес. компостирования неминерализованный остаток составил 29%. Опрыскивание соломы азотным удобрением и микробно-ферментативными биодеструкторами создает благоприятные условия для её минерализации. Наиболее результативное ускорения гумификации обеспечивало применение препарата Росток и его сочетание с биодеструкторами – коэффициент гумификации находился в диапазоне 1,2…1,3.

Ключевые слова: коэффициент гумификации, минерализация, биодеструкторы, разложение соломы, ферментативная активность почвы, отношение углерода к азоту, компостирование, лигнин.

Введение. Распространение ресурсосберегающих технологий в агропромышленный комплекс обеспечило повышение продуктивности пашни с одновременным снижением себестоимости получаемой продукции. Вместе с тем это привело к необходимости решения ряда проблем агротехнологического и агробиологического характера. Одна из них – воспроизводство плодородия пашни в условиях отказа от органических удобрений и севооборотов [1]. Причин отказа достаточно много: узкая специализация хозяйства; высокие экономические затраты; нехватка материальных и трудовых ресурсов. Поэтому чаще всего в качестве органических удобрений выступают послеуборочные остатки сельскохозяйственных культур, в том числе солома [2]. Её химический состав достаточно сильно варьирует и зависит от культуры, технологии возделывания, уровня минерального питания и ряда других факторов [3]. Использование соломы как самостоятельного органического удобрения имеет ряд технологических особенностей – необходимость измельчения с последующей запашкой; длительный срок трансформации в гумус и высвобождения питательных веществ [4]. В случае перехода хозяйства на безотвальную технологию обработки почвы или No-till добавляется еще ряд проблем с наличием соломы на полях, начиная от пожарной опасности и заканчивая снижением качества посева культур. Помимо этого, важно учитывать, что разлагающаяся на поверхности поля солома многократно увеличивает газообразные потери углерода в виде углекислого газа [5, 6].

Для решения этих проблем аграрному сектору предлагается ускорить процесс разложения соломы и пожнивно-корневых остатков вплоть до полной их минерализации. Использование азотных удобрений для повышения скорости разложения послеуборочных остатков – общеизвестный прием. На протяжении нескольких десятилетий было проведено большое количество полевых и модельных опытов [7]. Мнения исследователей по эффективности азотных удобрений разделились на две группы: одна отмечала резкое ускорение трансформации соломы и пожнивно-корневых остатков; другая – высказывалась об отсутствии значимого эффекта [8].

Давно известна эффективность стимулирования микробного разложения путем активизации местной (аборигенной) микробиоты и внесением бактерий или спор грибов, специализирующихся на деструкции целлюлозы и лигнина. Стимулирование почвенной микробиоты возможно несколькими путями – один из них обработка растительных остатков гуминовыми препаратами, в состав которых входят физиологически активные вещества, в том числе легкоподвижные гумусовые кислоты и

их производные. В составе гуминовых препаратов также находятся аминокислоты, низкомолекулярные белки и другие азотсодержащие водорастворимые органические соединения, которые жизненно важны для бактерий и грибов [9]. Препараты последних поколений обладают мощным эффектом и способны разрушить растительные остатки менее чем за год. Вместе с тем, возникает вполне закономерный вопрос о целесообразности ускорения темпов разложения соломы при отсутствии понимания направленности трансформации. В литературе часто встречается информация о повышении скорости деструкции соломы, высвобождении заключенных в ней питательных веществ [10]. Однако данных о гумификации послеуборочных остатков крайне мало и они противоречивы. В рекламе биодеструкторов и стернифагов, которую доносит их производитель аграриям, всегда указывается, что эти препараты усиливают гумификацию соломы и повышают плодородие. Об этом трудно объективно судить, поскольку чаще всего для исследований используют кратковременные (не более одного года) полевые опыты.

Определение степени гумификации растительных остатков достаточно трудоемкий процесс, требующий проведения многолетних опытов. В модельных опытах, проводимых в оптимальных условиях, целесообразно использовать косвенный метод определения направленности трансформации растительных остатков. Учитывая тот факт, что высокое содержание полифенолоксидазы (ПФО) сопряжено с гумификацией, а пероксидазы (ПО) – с минерализацией органического вещества почвы, расчет отношения ПФО к ПО покажет направленность трансформации растительных остатков.

Модельные опыты в оптимальных условиях, показывающие действительный потенциал приемов и средств ускорения разложения, затруднительны, но наиболее информативны. Именно при таком подходе есть возможность смоделировать многолетнюю трансформацию растительных остатков, исключая периоды очень низкой микробиологической активности почв. Особенно это актуально для условий Сибири, где активность почвенной биоты проявляется со второй половины мая до конца октября [11].

Цель исследований – установить степень эффективности агрохимикатов, используемых для ускорения разложения послеуборочных остатков яровой пшеницы, в темно-серой лесной почве.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в лабораторных условиях с моделированием оптимальных по температуре и влажности условий на протяжении 12 мес. В качестве объекта исследований была использована солома яровой пшеницы сорта Икар. Выбор культуры и сорта обоснован тем, что яровая пшеница выступает наиболее распространенной в Западной Сибири культурой.

Модельный опыт заложен в отапливаемой теплице НИИСХ Северного Зауралья – филиале ТюмНЦ СО РАН (г. Тюмень). Химический анализ почвы и растительных остатков проводили в агрохимической лаборатории этой же организации. Почву для компостирования заготавливали из пахотного слоя опытного поля НИИСХ Северного Зауралья, где выращивали зерновые культуры. Солома яровой пшеницы была взята с этого же поля. Почва – тёмно-серая лесная тяжелосуглинистая. Агрохимическая характеристика почвы следующая: содержание гумуса – 5,4% (ГОСТ 23740-2016), обменная кислотность (pHсол.) – 5,8 (ГОСТ Р 58594-2019). Содержание общего азота составляло 0,21% (ГОСТ Р 58596-2019); нитратного – 5,5 мг/кг (ГОСТ 26951-86), что соответствовало низкой обеспеченности; обменного аммонийного – 1,1 мг/кг (ГОСТ 26489-85). Обеспеченность подвижными фосфором и калием была повышенной и высокой (по Чирикову) при содержании 107 и 180 мг/кг (ГОСТ 26204-91) соответственно.

Солому яровой пшеницы резали вручную на фрагменты длиной 1…2 см. Измельченную массу помещали в пакеты, изготовленные из стеклотканевой сетки. Размер ячеек составлял 4 мм^2 (2 мм × 2 мм); толщина сетки – 0,2 мм. Выбранный материал для пакета обладал биологической инертностью, имел высокую механическую прочность и устойчивость к разрушению. Стеклотканевая сетка обеспечивала максимально возможный контакт почвы и соломы, не препятствовала движению воздуха и воды. Масса пшеничной соломы в пакете перед закладкой опыта варьировала от 20 до 30 г.

Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: препарат (фактор А) – вода (контроль), карбамидо-аммонийная смесь с содержанием азота 32% (КАС32), гуминовый препарат (ГП) Росток, микробионик Деструктор стерни (МДС), Биокомпозит-коррект (БКК), ГП Росток + КАС 32, МДС + КАС 32, БКК + КАС 32, ГП Росток + МДС, ГП Росток + БКК, ГП Росток + МДС + КАС 32, ГП Росток + БКК + КАС 32; срок экспозиции (фактор В) – 1, 2, 3, 6, 9 и 12 мес.

Дозы препаратов и норму расхода рабочей жидкости (600 л/га) применяли согласно рекомендациям производителей, а также основываясь на ранее проведенных исследованиях [12, 13].

В качестве гуминового препарата (ГП) был выбран Росток, производитель ООО «Эврика», который представляет 0,1% раствор гумата натрия с комплексом макро- и микроэлементов. Подробная его характеристика приведена в [14]. Биодеструкторы Микробионик Деструктор стерни (ООО Биокрафт) и Биокомпозит-коррект (АО «Щелково Агрохим») относятся к группе микробно-ферментативных препаратов.

Опрыскивание водой и растворами агрохимикатов при расходе рабочей жидкости 600 л/га проводили с двух сторон пакетов с соломой, непосредственно в день закладки опыта. В качестве компостера использовали пластиковые сосуды объемом 5 л. В них насыпали почву массой 2,5 кг, и вертикально размещали по 4 пакета с соломой, отделяя друг от друга и стенок сосуда слоем почвы. Размеры пакета (15 см × 20 см), толщина – не более 1 см. Досыпали почвой сверху слоем 10 см, обеспечивая максимальный ее контакт с соломой. Почву уплотняли вручную до 1,0… 1,2 г/см^3. То есть моделировали процесс запашки соломы в полевых условиях. Общее количество сосудов, используемых в опыте, составило 72 шт.

Сосуды закрывали полиэтиленовой пленкой с отверстиями диаметром до 1,0 см. В ходе компостирования каждый месяц определяли влажность почвы, при необходимости проводили полив водопроводной водой до 60% от предельно-полевой влагоемкости.

По истечению запланированных сроков экспозиции (1, 2, 3, 6 и 12 мес.) от каждого варианта отбирали по 1 сосуду, изымали пакеты с соломой, тщательно промывали проточной водой и, после сушки до воздушно-сухого состояния, солому измельчали в лабораторной мельнице. Содержимое каждого пакета анализировали отдельно, обеспечивая 4-кратное повторение по экспозиции. Определяли: общий азот – по ГОСТ 13496.4-2019; общий углерод – по ГОСТ 23740-79; активность ферментов (инвертаза, полифенолоксидаза, пероксидаза) – по общепринятым методикам [15, 16].

При отношении ПФО к ПО более единицы складываются оптимальные условия гумификации и чем больше это значение, тем выше степень гумификации растительных остатков. При значениях меньше единицы – растительные остатки подвергаются минерализации [17, 18].

Для оценки достоверности различий между вариантами и контролем применяли t-критерий Фишера для зависимых выборок. Расчет вели с использованием программного продукта Microsoft Excel. Достоверность различий вариантов относительно контроля доказана при α=0,05; df=12; tкрит=1,038. Часть результатов исследований подвергали математической обработке методом дисперсионного анализа.

Результаты и обсуждение. Через месяц компостирования масса пшеничной соломы в контроле не уменьшилась – отклонения относительно первоначальных значений были в пределах НСР (табл. 1). Трансформация соломы, выраженная в достоверной потере массы, была зафиксирована только через 2 мес. компостирования. Масса соломы за этот период уменьшилась на 8% относительно исходного состояния. В последующие месяцы темп минерализации соломы возрастал и по истечении 12-ти мес. ее неминерализованный остаток составил 48,0±0,4% от исходной массы.

Таблица 1 – Неминерализованный остаток соломы яровой пшеницы при обработке различными агрохимикатами, % от исходной массы

Препарат (фактор А)	Срок компостирования (фактор В), мес.						Среднее
	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	97	92	83	68	56	48	74
КАС 32	96	90	76	62	50	43	70
ГП Росток	96	94	81	63	50	41	71
МДС	90	88	72	61	47	43	67
БКК	92	88	81	64	53	43	70
ГП + КАС 32	96	93	72	55	46	36	66
МДС +КАС 32	90	85	70	54	43	33	63
БКК + КАС 32	90	83	76	57	46	32	64
ГП + МДС	88	84	70	54	43	31	62
ГП + БКК	95	84	76	52	45	34	64
ГП + МДС + КАС 32	92	80	71	52	44	30	62
ГП + БКК + КАС 32	89	78	71	52	42	29	60
Среднее	93	87	75	58	47	37	
$НСР_{05}$ для факторов, %: А – 7; В – 5; АВ – 4							

Рассчитанный коэффициент корреляции (r>0,95) показал прямую сильную связь между степенью разложения пшеничной соломы и временем компостирования. Динамику неминерализованных остатков соломы можно выразить следующим уравнением регрессии:

$y=-4{,}438x+97{,}362$ ($R^2=0{,}96$),

где y – доля неминерализовавшихся остатков соломы, % от исходного;

x – количество мес. компостирования;

R^2 – коэффициент детерминации.

В оптимальных для жизнедеятельности почвенной микробиоты условиях, полное разложение соломы яровой пшеницы без применения стимулирующих агрохимикатов произойдет в течение 22 мес.

С учетом климатических изменений на протяжении календарного года, благоприятный период для разложения растительных остатков в лесостепной зоне Западной Сибири будет с мая по сентябрь, то есть не более 5 мес. [19, 20]. Поэтому полная трансформация

запаханной соломы яровой пшеницы составит 5 лет. К аналогичному выводу пришли и другие исследователи, которые проводили изучение трансформации послеуборочных остатков в полевых условиях Западной Сибири [21].

Обработка соломы яровой пшеницы карбамидо-аммонийной смесью с содержанием азота 32% (КАС 32) в дозе 16 л/га не оказала достоверного влияния на скорость ее минерализации в первые два мес. – разница с контролем была в пределах НСР (7%). Через три мес. компостирования активность целлюлозоразрушающей микробиоты возросла – неминерализованный остаток соломы яровой пшеницы уменьшился до 76%, что на 7% меньше контрольного значения. Но в дальнейшем эффект от КАС 32 стал постепенно снижаться, вплоть до выравнивания с контролем – разница была в пределах ошибки опыта (НСР05 = 7%). По окончании годичного компостирования неминерализованный остаток пшеничной соломы в варианте с использованием КАС 32 составил 43% от исходной массы. Различие относительно контроля было в пределах ошибки. Отсутствие эффекта КАС 32 для разложения соломы яровой пшеницы обусловлено низкой активностью и численностью микробиоты в старопахотных темно-серых лесных почвах Западной Сибири [22, 23].

Эффективность ГП Росток в разложении соломы яровой пшеницы проявилась только после 6-месячного компостирования. Стимулирование почвенной микробиоты было незначительным – доля неминерализованного остатка после 6 и 12 мес. компостирования составила 50 и 41% соответственно. Разница с контролем превысила ошибку опыта (5%). Отсутствие серьезного эффекта от опрыскивания соломы гуминовым препаратом, по нашему мнению, обусловлено низкой численностью целлюлозоразрушающей биоты пахотного слоя темно-серой лесной почвы. Основополагающие причины уменьшения количества микробиоты: ежегодный оборот пахотного слоя во время вспашки, удаление соломы с поля и систематическое применение фунгицидов [24]. Низкая микробиологическая активность пашни стала серьезным аргументом необходимости использования биодеструкторов ферментативно-микробного типа на полях Западной Сибири.

Эффективность МДС проявилась после трех мес. компостирования. За этот период убыль соломы составила 28%, тогда как в контроле – 17% от исходной массы. В последующем эффект МДС в разложении соломы также был достоверным. После 12-ти мес. компостирования в этом варианте неминерализованный остаток составил 43%

БКК проявил себя в меньшей степени – разница в убыли массы соломы относительно контроля была минимальна и граничила с НСР. По завершении опыта неминерализованный остаток в варианте с использованием БКК был на уровне вариантов с КАС 32; ГП Росток, МДС. Возможной причиной отсутствия эффекта биодеструкторов было то, что обработанная солома не осталась на поверхности, где формируются аэробные условия, необходимые для жизнедеятельности стернефагов. На глубине 10…12 см трансформация растительных остатков происходит при дефиците кислорода, что положительно сказывается на активности гумусообразующей микробиоты. К аналогичному выводу пришли [25].

Повысить эффективность биодеструкторов и сохранить высокие темпы трансформации послеуборочных растительных остатков возможно посредством совместного их применения с азотными удобрениями и гуминовыми препаратами. В наших опытах сочетание биодеструкторов с Ростком и КАС 32 достоверно усилило эффект разложения соломы яровой пшеницы. По окончании 12-ти мес. компостирования её неминерализованный остаток составил лишь треть от исходной массы.

Отсутствие серьезного эффекта от биодеструкторов (МДС и БКК) также может быть вызвано низким содержанием азота в соломе яровой пшеницы. В вариантах, где сочетали КАС с МДС и БКК скорость минерализации возрастала уже во второй мес. компостирования. Эффективность их совместного применения прослеживалась на протяжении всего опыта. Через 12 мес. компостирования от соломы яровой пшеницы осталось 32…33% – разница относительно контроля существенно превышала ошибку опыта.

Отдельного внимания заслуживает вариант с внесением ГП Росток и КАС 32. За первые два месс. компостирования соломы убыль ее массы не отличалась от контроля, но в последующие месяцы, вплоть до завершения опыта, минерализация была максимальной. Учитывая тот факт, что в ГП Росток отсутствует активная микробиота, увеличение скорости минерализации обусловлено стимулированием нарастания местной почвенной микробиоты гуматами и минеральным азотом. Это подтверждается в вариантах, где совместно использовали гуминовый препарат и биодеструкторы растительных остатков. Достоверное повышение скорости разложения соломы отмечено после третьего мес. компостирования и продолжалось на всем протяжении опыта (12 мес.), неминерализированный остаток составил 31…34% от исходной массы соломы яровой пшеницы.

В вариантах с комплексным внесением ГП, КАС 32 и биодеструкторов процесс минерализации соломы не отличался от варианта, где азотные удобрения отсутствовали. Это указывает на возможность регулирования эффективности работы биодеструкторов гуминовыми препаратами, что может стать основой выбора направленности процесса трансформации послеуборочных остатков на полях.

Несмотря на разнообразие сочетаний агрохимикатов в опыте, за один год

компостирования не удалось добиться полной минерализации соломы в изучаемых вариантах: минимальное остаточное количество растительных остатков составляло 29…30% от исходной массы. Используемые в опыте агрохимикаты повышали эффективность минерализации соломы зерновых культур не более чем на 40% относительно контроля.

Для понимания процесса трансформации послеуборочных растительных остатков в почве, крайне важно знать не только убыль массы, но и изменения, происходящие на химическом уровне. К этому можно отнести содержание органического углерода, общего азота и их соотношение в компостируемых остатках.

Перед началом проведения опыта содержание углерода в соломе варьировало незначительно – от 48 до 53% (табл. 2), а азота – от 0,60 до 0,66% (табл. 3) от воздушно-сухой массы.

Содержание органического углерода в соломе контрольного варианта постепенно снижалось и через 12 мес. компостирования достигло 20%, что более чем в 2 раза было ниже исходного значения. Наиболее высокие темпы потери органического углерода отмечали в первые два месяца – с 48 до 38% и в последние 3 мес. компостирования, когда его содержание уменьшилось с 38 до 20%. По мнению [26], это объясняется последовательностью микробно-ферментативной деструкции соломы в почве. В первые месяцы происходит минерализация целлюлозы и гемицеллюлозы, а также имеющихся в соломе простых углеводов. Этот процесс сопровождается выделением диоксида углерода в атмосферу [27]. На поздних этапах трансформации растительных остатков усиливается деструкция лигнина, который обладает высокой устойчивостью к микробному воздействию. Потери органического углерода в этом случае обусловлены разрушением целлюлозного каркаса и отделением фрагментов лигнина во время отмывки соломы. На этом этапе лигнин, частично трансформируясь, переходит в категорию активных гумусовых веществ.

Обработка соломы изучаемыми агрохимикатами, за исключением варианта БКК + КАС 32, не оказала достоверного влияния на содержание органического углерода после одного месяца компостирования – все отклонения относительно исходной величины были меньше НСР (4%). Сочетание препарата БКК с КАС через месяц компостирования привело к уменьшению содержания органического углерода, что свидетельствует о высоких темпах разложения соломы.

Через 2 мес. компостирования и на протяжении оставшегося срока солома яровой пшеницы активно трансформировалась, о чем свидетельствует изменение содержания органического углерода. Наиболее сильное изменение зафиксировано после трех мес. компостирования в вариантах с применением биодеструкторов совместно с гуминовым препаратом и КАС 32. Содержание органического углерода в этих вариантах достигало 55…60%, что достоверно превышало исходные значения.

По окончанию модельного опыта (12 мес.) неминерализованный остаток соломы яровой пшеницы характеризовался различным содержанием органического углерода. В вариантах с использованием КАС 32 и ГП Росток содержание органического углерода в остатках не отличалось от контроля.

Таблица 2 – Динамика содержания органического углерода в компостируемой соломе яровой пшеницы, %

Препарат (фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)							Среднее
	исх.	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	48	46	38	39	36	38	20	38
КАС 32	51	49	47	42	34	35	23	40
Росток	50	49	45	40	32	33	21	39
МДС	51	48	44	51	33	36	16	40
БКК	49	48	53	50	38	33	18	41
ГП + КАС 32	50	49	46	50	36	38	30	43
МДС +КАС 32	51	49	48	52	41	38	18	42
БКК + КАС 32	53	42	41	59	38	40	15	41
ГП + МДС	50	51	42	56	32	31	19	40
ГП + БКК	48	46	47	51	32	30	22	39
ГП + МДС + КАС 32	50	48	51	60	34	38	30	44
ГП + БКК + КАС 32	51	51	51	55	36	38	32	45
Среднее	50	48	46	50	35	36	22	
$НСР_{05}$ для факторов, %: А – 4; В – 3; АВ – 5								

В вариантах с различным сочетанием агрохимикатов: ГП Росток + КАС 32; ГП + МДС + КАС 32; ГП + БКК + КАС 32 содержание органического углерода через 12 мес. компостирования достоверно превысило контроль. Это служит подтверждением улучшения условий для гумификации соломы.

В отличие от содержания органического углерода в течение всего срока компостирования, динамика общего азота была более сложной. Причина этого в том, что величина содержания общего азота складывается из остаточного количества элемента в компостируемой соломе и микробного азота, содержание

которого зависит от численности микроорганизмов, развивающихся на поверхности растительных остатков, и их активности [28].

В процессе компостирования в течение 2 мес. содержание общего азота в соломе яровой пшеницы в контроле постепенно снижалось с 0,61 до 0,55%, что обусловлено микробиологическими процессами денитрификации и последующей нитрификацией органических форм азота.

После контакта соломы с почвой начинается процесс постепенного нарастания сапрофитной микробиоты на ее поверхности с последующим проникновением внутрь растительных остатков. На третьем мес. компостирования было зафиксировано повышение содержания общего азота в соломе яровой пшеницы с 0,55 до 0,62%. Улучшение азотного состояния происходило и в последующие месяцы компостирования. По завершению 9-ти мес. содержание общего азота достигло максимальных значений – 0,90%. В последние три мес. компостирования было отмечено резкое снижение содержания азота в неминерализованной части соломы.

Обработка КАС 32 не оказала достоверного влияния на содержание общего азота в соломе после месяца компостирования. Через 2 мес. содержание общего азота в соломе, обработанной КАС 32, возросло до 0,76%, что было достоверно выше исходного значения (tфакт.>tтеор. при p=5%). После 6-ти мес. компостирования это значение достигло 0,86% и продолжало повышаться вплоть до 0,99% (9 мес. компостирования). В последние три мес. в неминерализованных остатках соломы содержание азота уменьшилось до исходного значения – 0,67%, что обусловлено снижением активности почвенной микробиоты [29]. По мнению О.В. Орловой и ее коллег, резкое изменение содержания общего азота в растительных остатках вызвано сменой микробиома [30]. Аналогичный эффект был установлен на растительных остатках различного происхождения, компостируемых в серых лесных почвах на протяжении трех лет [31]. Обработка соломы яровой пшеницы ГП Росток имела аналогичный азотному удобрению эффект в отношении содержания общего азота. Его максимальное значение было зафиксировано также после 9 мес. компостирования (0,88%) с последующим снижением до 0,59%.

МДС способствовал снижению содержания общего азота с 0,66 до 0,57% в течение первого мес. компостирования соломы, что свидетельствует об активном процессе минерализации. Нарастание микробной биомассы, и, как следствие, повышение доли общего азота произошло только после трех мес. компостирования. Через 9 мес. его значение достигло 0,87%, но к концу опыта (12 мес.) уменьшилось вдвое. Действие БКК было аналогичным МДС.

Таблица 3 – Динамика содержания общего азота в компостируемой соломе яровой пшеницы, %

Препарат (фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)							Среднее
	исх.	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	0,61	0,58	0,55	0,62	0,71	0,90	0,51	0,64
КАС 32	0,64	0,64	0,76	0,71	0,86	0,99	0,67	0,75
Росток	0,64	0,65	0,67	0,68	0,78	0,88	0,59	0,70
МДС	0,66	0,57	0,61	0,77	0,82	0,87	0,39	0,67
БКК	0,60	0,58	0,71	0,76	0,87	0,81	0,43	0,68
ГП + КАС 32	0,62	0,65	0,69	0,86	0,91	0,99	0,82	0,79
МДС +КАС 32	0,63	0,63	0,69	0,83	0,92	1,02	0,49	0,74
БКК + КАС 32	0,64	0,53	0,55	0,92	0,90	1,08	0,42	0,72
ГП + МДС	0,63	0,63	0,62	0,82	0,79	0,86	0,58	0,70
ГП + БКК	0,61	0,56	0,60	0,79	0,79	0,83	0,66	0,69
ГП + МДС + КАС 32	0,62	0,66	0,73	0,88	0,87	1,09	0,89	0,82
ГП + БКК + КАС 32	0,64	0,70	0,72	0,82	0,90	1,08	0,90	0,82
Среднее	0,63	0,62	0,66	0,79	0,84	0,95	0,61	
$НСР_{05}$ для факторов: А – 0,06%; В – 0,07%; АВ – 0,04%								

Сочетание ГП Росток и КАС 32 предотвратило снижение содержания азота в компостируемой соломе на протяжении первых 3 мес. – разница относительно исходного содержания была в пределах ошибки опыта. В последующем было зафиксировано увеличение до 0,99% доли азота в компостируемой соломе. Важно отметить, что по окончании опыта (12 мес.) содержание азота в неминерализованных остатках уменьшилось незначительно, достигнув 0,82%. Это подтверждает наличие целлюлозоразрушающей микробиоты и продолжение активного процесса трансформации растительных остатков. Аналогичный эффект был зафиксирован в вариантах, где сочетали все три агрохимиката: ГП + МДС + КАС 32; ГП + БКК + КАС 32 – отмечено сохранение достаточно большого количества общего азота после года компостирования соломы.

Соотношение углерода к азоту в соломе яровой пшеницы достаточно широкое – 77…82, учитывая тот факт, что ее отбор проводили на поле с выравненными агрохимическими свойствами.

После месяца компостирования величина этого показателя достоверно изменилась в вариантах: МДС; ГП + КАС 32; ГП + МДС + КАС 32; БКК + КАС 32 и ГП + МДС + КАС 32; ГП + БКК + КАС 32. Все отклонения в перечисленных вариантах были в пределах НСР (6 ед.) (табл. 4).

Серьезное изменение соотношения углерода к азоту по всем вариантам было зафиксировано только после 6-ти мес. компостирования. В контроле величина этого показателя уменьшилась с 79 до 51. Изучаемые агрохимикаты, как по отдельности, так и в сочетании друг с другом, способствовали обогащению компостируемых остатков азотом – C:N варьировало в диапазоне 40…44 ед., что достоверно отличалось от контроля (tфакт.>tтеор. при p=5%).

Таблица 4 – Динамика соотношения углерода к азоту (C:N) в компостируемой соломе яровой пшеницы, ед.

Препарат (фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)							Среднее
	исх.	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	79	80	69	63	51	43	40	61
КАС 32	79	77	62	60	40	35	35	55
Росток	79	76	67	59	42	38	36	57
МДС	77	84	72	67	40	41	40	60
БКК	82	83	75	66	44	40	41	62
ГП + КАС 32	82	76	67	58	40	38	37	57
МДС +КАС 32	81	78	70	63	44	37	37	59
БКК + КАС 32	82	81	67	65	42	38	36	59
ГП + МДС	80	81	69	69	41	36	33	58
ГП + БКК	78	82	78	65	41	37	34	59
ГП + МДС + КАС 32	82	73	70	68	40	35	34	57
ГП + БКК + КАС 32	81	73	71	68	40	35	35	58
Среднее	80	79	70	64	42	38	37	
$НСР_{05}$ для факторов, ед.: А –6; В – 5; АВ – 7								

В последние три мес. компостирования по всем вариантам была отмечена тенденция дальнейшего снижения соотношения органического углерода к общему азоту.

Процесс микробиологической трансформации растительных остатков достаточно хорошо прослеживается при анализе ферментативной активности почвы. Наиболее информативными в этом отношении выступают инвертаза, полифенолоксидаза и пероксидаза. Накопление инвертазы в почвах чаще всего обусловлено систематическим поступлением растительных остатков с высоким содержанием полисахаридов, в частности крахмала, целлюлозы и гемицеллюлозы.

Анализ исходного содержания инвертазы в каждом сосуде для компостирования показал ее стабильность (13,9…15,4 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы) при коэффициенте вариации <5,0%. За три мес. компостирования соломы яровой пшеницы активность инвертазы не отличалась от исходной величины. В последующие мес. В контроле относительная активность инвертазы достоверно возросла на 31…99%, что обусловлено появлением в почве свежих растительных остатков (табл. 5). Обработка соломы КАС 32 привела к резкому увеличению активности инвертазы с 14,3 до 26,8 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы. В период с 9 до 12 месяцев активность инвертазы начала снижаться, что обусловлено дефицитом легкодоступных полисахаридов. Опрыскивание соломы ГП Росто не оказало существенного влияния на накопление инвертазы в почве – достоверная разница с контролем зафиксирована только через 12 мес. компостирования соломы.

Использование препаратов МДС и БКК с первого месяца компостирования обеспечило увеличение содержания инвертазы. Ее относительная активность достигала в отдельные периоды 54…128% от исходной величины. Было установлено преимущество БКК относительно МДС, выражаемое тем, что на момент завершения опыта (12 мес.) активность инвертазы оставалась на высоком уровне – 30,3 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы, что более чем на 36% выше, чем в варианте с МДС.

Совместное использование биодеструкторов с азотным удобрением достоверно увеличивало активность инвертазы на протяжении 9 мес. компостирования. На заключительном этапе (с 9-го по 12-ый мес.) активность инвертазы значительно снизилась – ее содержание составило 24,9 и 25,7 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы, что соответствовало 46 и 38 % относительно исходной активности. Аналогичный эффект вызывает добавление ГП Росток к биодеструкторам.

Полифенолоксидаза и пероксидаза – наиболее важные для почвы ферменты, поскольку их синтез осуществляет микробиота, отвечающая за гумификацию и минерализацию растительных остатков в почве.

В контроле, где солому яровой пшеницы опрыскивали водой, активность полифенолоксидазы постепенно возрастала от 36% на третий мес. до 64% на девятый мес. компостирования. Активность пероксидазы была существенно ниже на протяжении всего опыта (табл.5).

Таблица 5 – Динамика относительной активности ферментов при компостировании темно-серой лесной почвы и соломы яровой пшеницы, обработанной различными агрохимикатами, % от исходного

Вариант	Срок компостирования, мес.											
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
	Инвертаза				Полифенолоксидаза				Пероксидаза			
Вода (контроль)	15*	31	78	99	36	27	64	27	23	15*	21	-4*
КАС 32	43	73	84	125	-9*	-23	7*	27	4*	2*	7*	13*
ГП Росток	28	38	78	108	52	75	81	61	25	58	17	12
МДС	74	96	111	54	91	114	65	21	155	243	65	39
БКК	66	93	101	115	128	106	66	48	193	106	87	22
ГП + КАС 32	55	87	106	96	37	0*	16	5*	37	16	35	-19
МДС +КАС 32	86	104	75	46	3*	13*	30	32	38	80	74	32
БКК + КАС 32	88	108	101	38	10*	14*	59	92	76	52	59	92
ГП + МДС	87	97	130	46	100	126	92*	71	78	65	18	5*
ГП + БКК	78	100	112	55	106	129	112	84	132	72	74	38
ГП + МДС + КАС 32	81	97	66	41	-6*	-13*	-9*	9*	25	40	45	24
ГП + БКК + КАС 32	89	104	118	60	17	11*	16	18	33	-1*	85	57
*разница с контролем недостоверна ($t_{факт.} \leq t_{теор.}$ при p=5%)												

Обработка соломы азотным удобрением КАС 32 не оказала существенного влияния на активность анализируемых ферментов, в отличие от ГП Росток, при использовании которого активность полифенолоксидазы увеличивалась на 52…81% относительно исходного значения. Активность пероксидазы возросла лишь на 12…58%. Причина всплеска активности полифенолоксидазы при опрыскивании ГП Росток заключается в том, что в составе гумусовых веществ присутствуют различные циклические органические соединения, главным образом, фенольные кольца. Их наличие стимулирует выработку полифенолоксидазы почвенной микробиотой, которая впоследствии будет участвовать в разрушении лигнина и его производных.

Обработка соломы биодеструкторами (МДС и БКК) нарушила не только равновесие между ферментами, но и привела к пиковой активности полифенолоксидазы и пероксидазы в первые полгода компостирования. В этот период активность пероксидазы возросла в 6,7…8,3 раза относительно контроля. Активность полифенолоксидазы возросла лишь в 2,5…3,5 раза, что свидетельствует о нарушении равновесия ферментов в почве.

Совместное использование биодеструкторов и КАС 32 уменьшает ферментативную активность почвы в целом, но нарушение равновесия между полифенолоксидазой и пероксидазой сохранялось на протяжении 12 мес. компостирования. Замена азотного удобрения на гуминовый препарат в вариантах с биодеструкторами восстановила равновесие ферментов на фоне существенного повышения их активности.

Солома яровой пшеницы в ходе компостирования в течение первых 6 мес. в равной степени подвергается минерализации и гумификации – отношение ПФО к ПО составляло 1,0 ед. (табл. 6). В последующем равновесие смещается в сторону синтеза гумусовых веществ – коэффициент гумификации увеличился до 1,2 ед. Исследования [32] подтвердили этот вывод с позиции биохимической трансформации растительных остатков. В первую очередь почвенная микробиота минерализует простые углеводы и часть целлюлозы, лишенной защитной оболочки из лигнина. И лишь при их отсутствии переходит на разрушение лигнина, который очень быстро трансформируется в гумусовые вещества.

Обработка соломы яровой пшеницы азотными удобрениями (КАС 32) приводила к созданию благоприятных условий для минерализации. Коэффициент гумификации на протяжении всего опыта изменялся от 0,6…0,7 в первой половине срока компостирования до 0,8…0,9 ед. в последующий период. Помимо этого, при любых вариантах с использованием сочетания других агрохимикатов с КАС 32 отмечали аналогичный эффект – минерализация соломы на протяжении целого года компостирования.

Эффект ГП Росток отличался от других препаратов. Помимо создания равновесного состояния в первой половине срока компостирования (6 мес.), в последующем создаются благоприятные условия для гумификации соломы яровой пшеницы. Отношение ПФО к ПО возрастает до 1,3…1,4 ед., что оказалось максимальным в опыте.

Опрыскивание соломы яровой пшеницы МДС обеспечило благоприятные условия для минерализации на протяжении 12 мес. компостирования – коэффициент гумификации не превышал 0,8 ед. Такой эффект обусловлен наличием в препарате микробиоты, специализирующейся на минерализации растительных остатков и возможного содержания в своем составе комплекса энзимов, отвечающих за деструкцию целлюлозы и лигнина. Аналогичный эффект был получен и другими исследователями, которые изучали эффективность биодеструкторов на различных растительных остатках [33, 34].

Таблица 6 – Коэффициент гумификации соломы яровой пшеницы при использовании различных агрохимикатов

Препарат (Фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)					Среднее
	исходная	3	6	9	12	
Вода (контроль)	0,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,1
КАС 32	0,8	0,7	0,6	0,8	0,9	0,8
Росток	0,9	1,1	1,0	1,4	1,3	1,1
Микробионик Деструктор стерни	0,8	0,6	0,5	0,8	0,7	0,7
Биокомпозит-коррект	0,9	0,7	0,9	0,8	1,1	0,9
ГП Росток + КАС 32	0,7	0,7	0,6	0,6	0,9	0,7
МДС +КАС 32	0,8	0,6	0,5	0,6	0,8	0,7
БКК + КАС 32	0,8	0,5	0,6	0,8	0,8	0,7
ГП Росток + МДС	0,8	0,9	1,1	1,3	1,3	1,1
ГП Росток + БКК	0,9	0,8	1,2	1,1	1,2	1,0
ГП Росток + МДС + КАС 32	0,8	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6
ГП Росток + БКК + КАС 32	0,8	0,7	0,9	0,5	0,6	0,7
Среднее	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0	
$НСР_{05}$ для факторов: А –1; В – 2; АВ – 4						

Использование препарата БКК, который также относится к группе биодеструкторов растительных остатков, имело более благоприятный эффект – смещение равновесия в сторону минерализации было не столь выраженным, как у МДС. Отношение полифенолоксидазы (ПФО) к пероксидазе (ПО) на протяжении трех мес. компостирования снизилось до 0,7 ед., что указывает на явный процесс минерализации соломы. В последующие 6 мес. величина этого показателя увеличилась до 0,8…0,9 ед. и в последние три мес. она достигла 1,1 ед., что свидетельствует о благоприятных условиях гумификации соломы яровой пшеницы. Совместное использование МДС и КАС 32 усиливало процесс минерализации – коэффициент гумификации на протяжении всего года варьировал от 0,5 до 0,8 ед. Для закрепления условий гумификации оптимальным выбором будет сочетание МДС или БКК с ГП Росток, что обеспечиваетдостаточно хороший эффект деструкции (убыль массы соломы) при стабильных условиях гумификации – отношение ПФО к ПО варьирует от 0,8 до 1,3 ед.

Выводы. Солома яровой пшеницы, компостируемая в темно-серой лесной почве в течении 2 мес., не претерпевает существенных изменений, как в количественном, так и качественном отношении. По истечении 12 мес. неминерализованный остаток составляет 48% от исходной массы. В естественных условиях в пахотной темно-серой лесной почве формируются оптимальные условия для гумификации соломы яровой пшеницы – коэффициент гумификации составляет 1,0…1,2 ед.

Использование карбамидо-аммонийной смеси, гуминового препарата Росток и биодеструкторов ферментативно-микробного действия достоверно ускоряет трансформацию соломы яровой пшеницы. Увеличение скорости разложения приходится на период с 3 по 9 мес. экспозиции. Сочетание гуминового препарата, КАС 32 и биодеструктора увеличивает минерализацию соломы яровой пшеницы в темно-серой лесной почве на 70%.

Опрыскивание соломы гуминовым препаратом Росток в дозе 1 л/га в сочетании с микробно-ферментативными биодеструкторами обеспечивает ускорение скорости ее гумификации в темно-серой лесной почве.

Сведения о финансировании. Работа финансировалась за счет средств бюджета Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья – филиала Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН в рамках темы FWRZ-2024-0009: «Разработка биоактиватора гумификации послеуборочных растительных остатков в агроценозе». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Литература

1. Турусов В. И., Коновалова Е. Я. Роль остаточной биомассы культур в регулировании биологической активности почвы в звеньях севооборотов юго-востока ЦЧР // Плодородие. 2024. № 6 (141). С. 5–9. doi: 10.25680/S19948603.2024.141.01.

2. Бобренко И. А., Воронкова Н. А. Использование соломы в земледелии Западной Сибири: рекомендации производству // Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина. 2022. 24 с.

3. Role of Lignin in Wheat Plant for the Enhancement of Resistance against Lodging and Biotic and Abiotic Stresses. / M. W. Riaz, M. I. Yousaf, Q. Hussain, et al. // Stresses. 2023. No. 3. P. 434–453. URL: https:// pdfs.semanticscholar.org/220d/c89f7430f335736584cbebadda51260ede4d.pdf (дата обращения: 10.02.2025).doi: 10.3390/ stresses3020032.

4. Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: A review / V. Ninkuu, Zh. Liu, A. Qin, et al. // Heliyon. 2025. Vol. 11. No. 2. e41651. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025000313 (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41651.

5. Демин Е. А., Миллер С. С. Влияние различных способов обработки и температуры почвы на эмиссию

углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Земледелие. 2024. № 4. С. 13–18. doi: 10.24412/0044-3913-2024-4-13-18.

6. Завалин А. А., Карашаева А. С., Хусайнов Х. А. К вопросу эмиссии и секвестирования углерода в земледелии Чеченской Республики // Агрохимический вестник. 2024. № 1. С. 19–23. doi: 10.24412/1029-2551-2024-1-004.

7. Composition and functioning of microbial communities in the decomposition of straw cereals in sod podzolic soil / O. V. Orlova, E. E. Andronov, N. I. Vorobyov, et al. // Agricultural Biology. 2015. Vol. 50. No. 3. P. 305–14. doi: 10.15389/agrobiology.2015.3.305rus.

8. Русакова И. В. Эффективность микробных деструкторов послеуборочных остатков в лабораторных и полевых экспериментах // Владимирский земледелец. 2021. № 2 (96). С. 34–40. doi: 10.24412/2225-2584-2021-2-34-40.

9. Влияние состава и доз органоминерального удобрения на продуктивность культур / И. В. Грехова, Н. В. Литвиненко, В. Ю. Грехова и др. // Вестник КрасГАУ. 2021. № 10 (175). С. 80–87. doi: 10.36718/1819-4036-2021-10-80-87.

10. Влияние микробиологических препаратов и внесения азота на процессы, связанные с секвестрацией органического углерода в чернозёме типичном слабоэродированном / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, М. Н. Масютенко и др. // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 1. С. 113–121. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-113-121.

11. Конверсия пашни в залежь увеличивает стабильность органического вещества почвы / Е. А. Филимоненко, М. А. Упорова, Е. А. Арбузова и др. // Агрофизика. 2023. № 3. С. 9–16. doi: 10.25695/AGRPH.2023.03.02.

12. Ахтямова А. А., Еремин Д. И. Изменение химического состава соломы яровой пшеницы при использовании гуминового препарата «Росток» в лесостепи Зауралья // Вестник КрасГАУ. 2023. № 4 (193). С. 58–65. doi: 10.36718/1819-4036-2023-4-58-65.

13. Еремин Д. И., Ахтямова А. А. Регулирование скорости разложения запахиваемой соломы в лесостепной зоне Зауралья // Агропродовольственная политика России. 2016. № 12 (60). С. 54–57.

14. Грехова И. В. Гуминовый препарат из низинного торфа // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 87–90.

15. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 256 с.

16. Козлов А. В. Методы почвенной микробиологии и энзимологии в экосистемных исследованиях. М.: Плодородие, 2023. 152 с.

17. Изменчивость полифенолоксидазной и пероксидазной активности агродерново-подзолистой почвы разной окультуренности с биоуглем / Е. Я. Рижия, Л. В. Бойцова, В. Е. Вертебный и др. // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 3. С. 476–485. doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus.

18. Bernard T. N. O., George S. A., Firibu K. S. Predictive Modelling of Peroxidase, Polyphenol Oxidase and Catalase in Post-Harvest White Trifoliate (D. Dumetorum Var.) Yam Tubers. // Food Science & Nutrition Technology. 2020. No. 5 (6). P. 000237. URL: https://medwinpublishers.com/FSNT/predictive-modelling-of-peroxidase-polyphenol-oxidase-and-catalase-in-post-harvest-white-trifoliate-d-dumetorum-var-yam-tubers.pdf (дата обращения 10.02.2025). doi: 10.23880/fsnt-16000237.

19. Изменения почвенной эмиссии CO2 в таежных экосистемах Центральной Сибири: от суточной до межсезонной динамики / А. В. Махныкина, Д. А. Полосухина, Н. Н. Кошурникова и др. // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1. № 3. С. 205–210. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-205-210.

20. Зоркина К. А., Горлова О. П. Влияние последействия органических удобрений на состояние мезобиоты и некоторые свойства почв в условиях Красноярской лесостепи // Вестник КрасГАУ. 2017. № 1(124). С. 138–143.

21. Шахова О. А. Интенсивность разложения клетчатки на серых лесных и чернозёмных почвах при использовании различных систем основной обработки в Северном Зауралье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5 (97). С. 9–13.

22. Майсямова Д. Р., Еремин Д. И. Изменение микрофлоры пахотного чернозема лесостепной зоны Зауралья под действием механической обработки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 1 (183). С. 17–27.

23. Перфильев Н. В., Вьюшина О. А. Биологическая активность темно-серой лесной почвы и урожайность ячменя в зависимости от различных систем основной обработки // Вестник КрасГАУ. 2023. № 7 (196). С. 3–11. doi: 10.36718/1819-4036-2023-7-3-11.

24. Sahab S., Suhani I., Singh R. P. Valuing each patch of land: Utilizing plant-microbe interactions for the betterment of agriculture // Microbes in Land Use Change Management. 2021. P. 471–507. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244487000292 (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.1016/B978-0-12-824448-7.00024-3.

25. Влияние биопрепаратов на почвенное органическое вещество, структурное и биологическое состояние чернозема типичного слабоэродированного / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, Н. А. Чуян и др. Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2022. 217 с.

26. Nutrient Recycling, Wheat Straw Decomposition, and the Potential Effect of Straw Shear Strength on Soil Mechanical Properties / Ya. Wang, A. Adnan, X. Wang, et al. // Agronomy. 2020. Vol. 10. No. 2. P. 314. URL: https://doi.org/10.3390/agronomy10020314 (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.3390/agronomy10020314.

27. Демин Е. А., Миллер С. С., Ахтямова А. А. Влияние минеральных удобрений и температуры почвы на эмиссию углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Земледелие. 2024. № 1. С. 17–22. doi: 10.24412/0044-3913-2024-1-17-22.

28. Decomposition characteristics of rice straw returned to the soil in northeast China / Ch. Yan, Sh. Sh. Yan, T. Yu. Jia, et al. // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2019. Vol. 114. No. 3. P. 211–224. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-019-09999-8 (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.1007/s10705-019-09999-8.

29. Гамзиков Г. П., Сулейменов С. З. Азотминерализующая способность серой лесной почвы Новосибирского Приобья при компостировании и паровании растительных остатков // Почвоведение. 2021. № 5. С. 582–591. doi: 10.31857/S0032180X21050087.

30. Таксономический состав и организация микробного сообщества дерново-подзолистых почв после внесения соломы зерновых культур и использования препарата Баркон / О. В. Орлова, Е. Л. Чирак, Н. И. Воробьев и др. // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. № 1. С. 47–64. doi: 10.15389/agrobiology.2019.1.47rus.

31. Plant Residues Decomposition and Formation of Active Organic Matter in the Soil of the Incubation Experiments / V. M. Semenov, N. B. Pautova, T. N. Lebedeva, et al. // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 10. P. 1183–1194. doi: 10.1134/S1064229319100119

32. Humic acids: properties, structure, and application / A. Dauletbay, D. Hanzheng, A. N. Ongalbek, et al. // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. 2024. No. 3 (15). P. 321–340. doi: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-41.

33. Бамбалов Н. Н. Изменение элементного состава лигнина в процессе гумификации // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1193–1200.

34. Ильина Г. В., Ильин Д. Ю., Воробьева А. А. Влияние продуктов деградации лигнина на динамику комплекса мицелиальных грибов в модельных условиях // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 4 (36). С. 79–91. doi: 10.21685/2307-9150-2021-4-8.

Сведения об авторах:

Ерёмин Дмитрий Иванович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, e-mail: soil-tyumen@yandex.ru

Любимова Анна Валерьевна – кандидат биологических наук, зав. лабораторией геномных исследований в растениеводстве, e-mail: ostapenkoav88@yandex.ru

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, пос. Московский, Тюменская обл., Россия.

EFFICIENCY OF AGROCHEMICALS USING TO ACCELERATE POST-HARVEST RESIDUES DECOMPOSITION OF SPRING WHEAT IN DARK-GRAY FOREST SOIL

D. I. Eremin, A. V. Lyubimova

Abstract. The study was conducted to determine the effectiveness of agrochemicals used to accelerate the decomposition of post-harvest residues of spring wheat in dark-gray forest soil. The study was conducted in 2023-2024 in a model experiment using composting of arable dark-gray forest soil. The experimental design involved composting spring wheat straw for 12 months under conditions optimal for the development of soil microbiota (temperature 20-22°C; soil moisture 60-70% of the maximum field capacity) with the addition of various agrochemicals. After 1, 2, 3, 6, 9 and 12 months, the straw was removed and the mass of non-mineralized residue, organic carbon content and total nitrogen were determined. The activities of invertase, polyphenol oxidase and peroxidase were determined to study the direction of decomposition process of post-harvest residues in the soil, In the absence of agrochemicals, spring wheat straw in dark gray forest soil does not undergo significant changes after 2 months of composting. Its reliable transformation occurs between 3rd and 12th months of exposure. The mass loss was 52% of the original; the carbon-to-nitrogen ratio decreased from 79 to 40 after one year of composting. The humification coefficient throughout the experiment was equal to 1.1...1.2, indicating the creation of optimal conditions for straw humification in dark gray forest soil. Treating straw with urea-ammonia mixture, the humic preparation Rostok, Mikrobionik stubble destructor and Biokompozit corrector accelerates the decomposition of spring wheat straw. The maximum effect in the experiment was observed with the combined use of KAS 32, the humic preparation and one of the biodestructors. Unmineralized residue was 29% after 12 months of composting. Spraying straw with nitrogen fertilizer and microbial-enzymatic biodestructors creates favorable conditions for its mineralization. The most effective acceleration of humification was achieved with the use of Rostok and its combination with biodestructors – the humification coefficient was in the range of 1.2-1.3.

Key words: humification coefficient, mineralization, biodestructors, straw decomposition, soil enzymatic activity, carbon-to-nitrogen ratio, composting, lignin.

References

1. Turusov VI, Konovalova EYa. [The role of residual crop biomass in regulating soil biological activity in crop rotation links in the south-east of the Central Black Earth region]. Plodorodie. 2024; 6 (141). 5-9 p. doi: 10.25680/S19948603.2024.141.01.

2. Bobrenko IA, Voronkova NA. Ispolzovanie solomy v zemledelii Zapadnoy Sibiri: rekomendatsii proizvodstvu. [Straw use in Western Siberian agriculture: recommendations for production]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni P.A. Stolypina. 2022; 24 p.

3. Riaz MW, Yousaf MI, Hussain Q. Role of lignin in wheat plant for the enhancement of resistance against lodging and biotic and abiotic stresses. [Internet]. Stresses. 2023; No.3. 434-453 p. [cited 2025, February 10]. Available from: https://pdfs.semanticscholar.org/220d/c89f7430f335736584cbebadda51260ede4d.pdf. doi: 10.3390/ stresses3020032.

4. Ninkuu V, Liu Zh, Qin A. Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: a review. [Internet]. Heliyon. 2025; Vol.11. No.2. e41651 p. [cited 2025, February 10]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025000313. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41651.

5. Demin EA, Miller SS. [Influence of different tillage methods and soil temperature on carbon dioxide emissions in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Zemledelie. 2024; 4. 13-18 p. doi: 10.24412/0044-3913-2024-4-13-18.

6. Zavalin AA, Karashaeva AS, Khusaynov KhA. [On the issue of carbon emission and sequestration in agriculture of the Chechen Republic]. Agrokhimicheskiy vestnik. 2024; 1. 19-23 p. doi: 10.24412/1029-2551-2024-1-004.

7. Orlova OV, Andronov EE, Vorobev NI. Composition and functioning of microbial communities in the decomposition of straw cereals in sod podzolic soil. Agricultural Biology. 2015; Vol.50. No.3. 305-314. doi: 10.15389/agrobiology.2015.3.305rus.

8. Rusakova IV. [Efficiency of microbial destructors of post-harvest residues in laboratory and field experiments]. Vladimirskiy zemledelets. 2021; 2 (96). 34-40 p. doi: 10.24412/2225-2584-2021-2-34-40.

9. Grekhova IV, Litvinenko NV, Grekhova VYu. [Influence of the composition and doses of organic and mineral

fertilizer on crop productivity]. Vestnik KrasGAU. 2021; 10 (175). 80-87 p. doi: 10.36718/1819-4036-2021-10-80-87.

10. Masyutenko NP, Kuznetsov AV, Masyutenko MN. [Influence of microbiological preparations and nitrogen application on the processes associated with the sequestration of organic carbon in typical slightly eroded chernozem]. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2024; 1. 113-121 p. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-113-121.

11. Filimonenko EA, Uporova MA, Arbuzova EA. [Conversion of arable land into fallow land increases the stability of soil organic matter]. Agrofizika. 2023; 3. 9-16 p. doi: 10.25695/AGRPH.2023.03.02.

12. Akhtyamova AA, Eremin DI. [Changes in the chemical composition of spring wheat straw using the humic preparation Rostok in the forest-steppe of Trans-Urals]. Vestnik KrasGAU. 2023; 4 (193). 58-65 p. doi: 10.36718/1819-4036-2023-4-58-65.

13. Eremin DI, Akhtyamova AA. [Regulation of the decomposition rate of plowed straw in the forest-steppe zone of Trans-Urals]. Agroprodovolstvennaya politika Rossii. 2016; 12 (60). 54-57 p.

14. Grekhova IV. [Humic preparation from lowland peat]. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2015; 1. 87-90 p.

15. Khaziev FKh. Metody pochvennoy enzimologii. [Methods of soil enzymology]. Moscow: Nauka. 2005; 256 p.

16. Kozlov AV. Metody pochvennoy mikrobiologii i enzimologii v ekosistemnykh issledovaniyakh. [Methods of soil microbiology and enzymology in ecosystem studies]. Moscow: Plodorodie. 2023; 152 p.

17. Rizhiya EYa, Boytsova LV, Vertebnyy VE. [Variability of polyphenol oxidase and peroxidase activity in agro-sod-podzolic soils of different cultivation levels with biochar]. Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2022; Vol.57. 3. 476-485 p. doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus.

18. Bernard TNO, George SA, Firibu KS. Predictive modelling of peroxidase, polyphenol oxidase and catalase in post-harvest white trifoliate (D. Dumetorum Var.) yam tubers. [Internet]. Food Science & Nutrition Technology. 2020; No.5 (6). 000237 p. [cited 2025, February 10]. Available from: https://medwinpublishers.com/FSNT/predictive-modelling-of-peroxidase-polyphenol-oxidase-and-catalase-in-post-harvest-white-trifoliate-d-dumetorum-var-yam-tubers.pdf. doi: 10.23880/fsnt-16000237.

19. Makhnykina AV, Polosukhina DA, Koshurnikova NN. [Changes in soil CO2 emissions in taiga ecosystems of Central Siberia: from daily to inter-seasonal dynamics]. Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem. 2018; Vol.1. 3. 205-210 p. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-205-210.

20. Zorkina KA, Gorlova OP. [Influence of organic fertilizers' aftereffect on the state of mesobiota and some properties of soil in Krasnoyarsk forest-steppe zone]. Vestnik KrasGAU. 2017; 1(124). 138-143 p.

21. Shakhova OA. [Intensity of fiber decomposition on gray forest and chernozem soil using various primary tillage systems in the Northern Trans-Urals]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; 5 (97). 9-13 p.

22. Maysyamova DR, Eremin DI. [Changes in the microflora of arable chernozem in the forest-steppe zone of the Trans-Urals under the influence of mechanical cultivation]. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; 1 (183). 17-27 p.

23. Perfilev NV, Vyushina OA. [Biological activity of dark gray forest soil and barley yield depending on various primary tillage systems]. Vestnik KrasGAU. 2023; 7 (196). 3-11 p. doi: 10.36718/1819-4036-2023-7-3-11.

24. Sahab S, Suhani I, Singh RP. Valuing each patch of land: Utilizing plant-microbe interactions for the betterment of agriculture. [Internet]. Microbes in Land Use Change Management. 2021; 471-507 p. [cited 2025, February 10]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244487000292. doi: 10.1016/B978-0-12-824448-7.00024-3.

25. Masyutenko NP, Kuznetsov AV, Chuyan NA. Vliyanie biopreparatov na pochvennoe organicheskoe veshchestvo, strukturnoe i biologicheskoe sostoyanie chernozema tipichnogo slaboerodirovannogo. [Effect of biopreparations on soil organic matter, structural and biological state of typical slightly eroded chernozem]. Kursk: Kurskiy federalnyy agrarnyy nauchnyy tsentr. 2022; 217 p.

26. Wang Ya, Adnan A, Wang X. Nutrient recycling, wheat straw decomposition, and the potential effect of straw shear strength on soil mechanical properties. [Internet]. Agronomy. 2020; Vol.10. No.2. 314 p. [cited 2025, February 10]. Available from: https://doi.org/10.3390/agronomy10020314. doi: 10.3390/agronomy10020314.

27. Demin EA, Miller SS, Akhtyamova AA. [Effect of mineral fertilizers and soil temperature on carbon dioxide emission in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Zemledelie. 2024; 1. 17-22 p. doi: 10.24412/0044-3913-2024-1-17-22.

28. Yan Ch, Yan ShSh, Jia TYu. Decomposition characteristics of rice straw returned to the soil in northeast China. [Internet]. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2019; Vol.114. No.3. 211-224 p. [cited 2025, February 10]. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-019-09999-8. doi: 10.1007/s10705-019-09999-8.

29. Gamzikov GP, Suleymenov SZ. [Nitrogen-mineralizing capacity of gray forest soil of Novosibirsk Priobye region during composting and fallowing of plant residues]. Pochvovedenie. 2021; 5. 582-591 p. doi: 10.31857/S0032180X21050087.

30. Orlova OV, Chirak EL., Vorobev NI. [Taxonomic composition and organization of microbial community of sod-podzolic soil after the addition of cereal straw and use of Barkon preparation]. Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2019; Vol.54. 1. 47-64 p. doi: 10.15389/agrobiology.2019.1.47rus.

31. Semenov VM, Pautova NB, Lebedeva TN. Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments. Eurasian Soil Science. 2019; Vol.52. No.10. 1183-1194 p. doi: 10.1134/S1064229319100119

32. Dauletbay A, Hanzheng D, Ongalbek AN. Humic acids: properties, structure, and application. Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. 2024; No.3 (15). 321-340 p. doi: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-41.

33. Bambalov NN. [Changes in the elemental composition of lignin during humification]. Pochvovedenie. 2011; 10. 1193-1200 p.

34. Ilina GV, Ilin DYu, Vorobeva AA. [Effect of lignin degradation products on the dynamics of a filamentous fungal complex under model conditions]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki. 2021; 4 (36). 79-91 p. doi: 10.21685/2307-9150-2021-4-8.

Authors:

Eremin Dmitriy Ivanovich – Doctor of Biological Sciences, leading researcher of Laboratory of Genomic Research in Plant Growing, e-mail: soil-tyumen@yandex.ru

Lyubimova Anna Valerevna – Ph.D. of Biological Sciences, Head of Laboratory of Genomic Research in Plant Growing, e-mail: soil-tyumen@yandex.ru

Northern Urals Research Institute of Agriculture – branch of Federal Research Center of Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Moskovskiy setlement, Tyumen region, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-31-38
УДК 633.111.1:631.527

ОЦЕНКА АДАПТИВНОСТИ СОРТОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ РАЗНЫХ ПЕРИОДОВ СОРТОСМЕНЫ МЕТОДОМ GGE BIPLOT АНАЛИЗА

В. Г. Захаров, О. Д. Яковлева

Реферат. Повышение урожайного потенциала выступает одним из наиболее значимых направлений селекционной работы. Цель исследований – провести оценку урожайности и адаптивности сортов яровой мягкой пшеницы различных периодов селекции с использованием метода GGE biplot анализа, выявить репрезентативные и дифференцирующие среды (годы). Работу выполняли в 2017–2024 годы в условиях Средневолжского региона, на модельном наборе из 18 сортов яровой мягкой пшеницы, которые представляют собой сортосмену культуры в Ульяновской области. Основное влияние на варьирование урожайности оказали условия среды (годы), которые объяснили 48,14% дисперсии. Вторым по значимости стал вклад сорта, составивший 35,63%. Наименьшее в эксперименте влияние на изменчивость урожайности оказывало взаимодействие «генотип × среда» – 11,63%. Оценка урожайности, адаптивности и стабильности методом GGE biplot анализа выявила, что сорта Никон, Бурлак и Экада 214, включенные в Госреестр в последние годы, имеют большую ценность. Она обусловлена их способностью к реализации генетически высокой потенциальной урожайности в сочетании со стабильностью её формирования в широком диапазоне погодно-климатических условий, в отличие от сортов более ранних периодов сортосмены – Лютесценс 62, Саратовская 36, Волжанка. Наибольшая в опыте средняя урожайность за годы исследований отмечена у сорта Никон (4,41 т/га). Результаты biplot анализа выявили его близость на графике к «идеальному» генотипу с точки зрения продуктивности и стабильности. По убыванию урожайности от Никона, расположены сорта Экада 214 (4,27 т/га), Бурлак (4,21 т/га), Ульяновская 105 (4,19 т/га), Экада 70 (3,82 т/га), Маргарита (3,79 т/га), Симбирцит (3,80 т/га), Ульяновская 100 (3,82 т/га).

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница (*Triticum aestivum L.*), сорт, сортосмена, урожайность, стабильность, генотип, мегасреда.

Введение. Пшеница (*Triticum aestivum* L.) – одна из важнейших злаковых культур, её возделывают во многих странах мира. Для большинства населения Земли – это главная продовольственная культура, обеспечивающая поступление 20% калорий. В будущем она, скорее всего, окажет большее влияние на мировое питание, чем любая другая культура, благодаря своей способности к высокой адаптации к различным широтам и меняющимся условиям произрастания [1].

В России возделывают яровую и озимую пшеницу, которая занимает более половины всех посевных площадей сельскохозяйственных культур. В 2023 году на долю яровой пришлось около 47% посевной площади под пшеницей, составившей 29,7 млн га.

Увеличение экологической устойчивости сортов и агроценозов служит ключевым фактором интенсификации производства продукции растениеводства [2]. Современные сорта должны обладать не только высокой урожайностью, но и устойчивостью к неблагоприятным условиям окружающей среды, то есть быть высоко адаптивными и высоко гомеостатичными, при этом высокая адаптивность сорта может обеспечить стабильность урожая в различных экологических условиях [3]. В то же время известно, что между потенциальной продуктивностью и экологической устойчивостью культурных растений часто наблюдают отрицательную корреляцию. В результате односторонней селекции на высокую потенциальную продуктивность может происходить снижение как общей, так и специфической экологической устойчивости сортов и гибридов [4].

Средняя прибавка урожая у новых сортов обусловлена главным образом заметным преимуществом их по продуктивности в наиболее благоприятные годы. В то же время при неблагоприятных условиях новейшие сорта могут уступать по урожайности на ту же величину. Лишь единичные сорта при этом сохраняют более высокий минимальный порог урожайности. Следовательно, параллельно с повышением потенциала продуктивности пшеницы стала проявляться тенденция к снижению стабильности урожайности [5]. В этой связи повышение урожайности и её стабильности выступает одной из главных целей селекционной работы.

Для достижения этой цели, необходимо решить три ключевые задачи: увеличение потенциала урожайности (максимальная урожайность для конкретного генотипа в оптимальных условиях), защита этого потенциала и повышение эффективности использования ресурсов для обеспечения устойчивости [6].

Знание изменений в растениях, связанных с повышением урожайности возделываемых культур, имеет большое значение для понимания факторов, его ограничивающих, и разработки стратегий будущего генетического улучшения растений. Наиболее распространенный подход включает ретроспективные исследования, состоящие из прямого сравнения уровня продуктивности и адаптивности старых и современных сортов, изучаемых в одном опыте.

Для оценки результатов исследований в последние годы разработано множество методов, как отечественных исследователей, так и зарубежных, позволяющих оценивать стабильность генотипов в разных средах испытания.

В то же время неэффективные методы анализа взаимодействия генотипа с окружающей средой могут создавать трудности для селекционеров, стремящихся выбрать генотипы с наилучшими характеристиками в различных средах. В последнее время для оценки селекционного материала часто используют анализ AMMI (additive main effects and multiplicative interaction), который применяют для оценки взаимодействия «генотип – среда» с использованием данных урожайности, полученных в многосредовых испытаниях. Эта модель объединяет аддитивные компоненты основных эффектов генотипов и сред, а также мультипликативные компоненты их взаимодействия.

Урожайность отдельного генотипа в каждой из сред (лет испытания) можно представить как сумму эффекта внешней среды (environment main effect (E)), эффекта генотипа (genotype main effect (G)) и взаимодействия генотипа со средой (genotype-environment interaction (GE или GEI)) [7, 8].

Эффекты генотипа и его взаимодействие со средой необходимо непременно принимать во внимание совместно при принятии решений о дальнейшем использовании исходного или селекционного материала. Учитывая это, W. Yan и его коллеги объединили эти эффекты в одну комбинацию, которую назвали GGE [9].

Получаемые в результате проведения экологических испытаний в течение ряда лет в различных средах значения средней урожайности нередко сложно анализировать по причине изменения ранжирования сортов в зависимости от складывающихся условий. GGE biplot анализ позволяет значительно облегчить и ускорить оценку анализируемых наборов сортов путем визуализации данных средней урожайности и стабильности. Кроме того, GGE biplot позволяет ранжировать генотипы и условия на основе фактических данных относительно гипотетических «идеальным» генотипов или условий. Важным аспектом служит возможность визуализации полученных результатов через построение графика зависимости двух основных компонентов (principal component (PC1 и PC2) благодаря сингулярному расположению данных. В последние годы этот метод анализа широко применяют на различных культурах и в разных экологических условиях [10, 11, 12].

Цель исследования – провести оценку урожайности и адаптивности сортов яровой мягкой пшеницы различных периодов селекции с использованием метода GGE biplot анализа, выявить репрезентативные и дифференцирующие среды (годы).

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2017–2024 годы на опытном поле Ульяновского НИИСХ – филиала СамНЦ РАН. Почва опытного участка представлена черноземом слабо выщелоченным тяжелосуглинистым. Мощность гумусового горизонта составляет 0,79 м, содержание гумуса варьирует от 5,3 до 5,9%, а реакция среды (pH водной вытяжки) верхнего слоя– от 5,5 до 7,0.

Посев во все годы исследования проводили сеялкой центрального высева СН-10Ц. В качестве предшественника использовали сидеральный пар, повторность четырёхкратная, площадь делянок составляла 15,1…18,4 м^2. Норму высева устанавливали из расчёта 5,5 млн всхожих зерен на 1 га. Закладку опытов проводили согласно «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур» [13]. Агротехника возделывания – общепринятая для культуры. Учет урожайности сортов осуществляли методом сплошного обмолота делянок с использованием комбайна SAMPO-130, с последующим приведением зерна к стандартной влажности и чистоте.

Для оценки урожайности и стабильности сортов, взаимодействия генотипа и среды, анализа дифференцирующей способности лет испытания, а также распределения генотипов и сред в главных компонентах использовали GGE biplot анализ в программе PBtools.

В качестве исходного материала для исследований использовали модельный набор, состоящий из 18 сортов яровой мягкой пшеницы разных периодов сортосмены в Ульяновской области: Лютесценс 62, Саратовская 36, Волжанка, Кутулукская, Симбирка, Ишеевская, Л 503, Землячка, Экада 6, Симбирцит, Экада 70, Маргарита, Экада 109, Ульяновская 100, Ульяновская 105, Бурлак, Экада 214 и Никон.

В период проведения исследований гидротермические условия отличались значительной контрастностью. Лучшими для роста и развития растений, а также для реализации генетического потенциала урожайности яровой пшеницы были 2017 году (ГТК = 1,4, норма 1,0) и 2022 году (ГТК = 1,6), умеренно благоприятными – 2020 году (ГТК = 1,3) и 2023 году (ГТК =0,5), удовлетворительным – 2021 году (ГТК =0,5). В целом близкими по метеоусловиям, но различающимися по их неблагоприятным воздействиям в отдельные фазы развития растений были 2018 году (ГТК = 0,47), 2019 году (ГТК = 1,0) и 2024 году (ГТК = 0,9).

Различающиеся погодные условия позволили достоверно оценить анализируемые среды по дифференцирующей способности, а сорта по урожайности, стабильности её формирования и адаптивности.

Результаты и обсуждение. Максимальная в опыте средняя урожайность изучаемых сортов сформировалась в 2017 году (4,38 т/га), минимальная (2,24 т/га) – в 2021 году (табл. 1).

Таблица 1 – Урожайность сортов яровой пшеницы (2017–2024 годы), т/га

Сорт	Код сорта	Год, код года								Среднее по сорту
		2017 E1	2018 E2	2019 E3	2020 E4	2021 E5	2022 E6	2023 E7	2024 E8	
Лютесценс 62	G1	3,32	2,29	2,48	3,20	1,71	2,50	2,77	1,43	2,46
Саратовская 36	G11	3,26	2,60	3,01	3,09	2,12	3,24	3,29	2,00	2,83
Волжанка	G12	3,21	2,48	2,68	3,17	2,10	2,94	3,23	1,87	2,71
Кутулукская	G13	3,83	2,94	3,23	3,38	2,13	3,67	3,59	2,23	3,13
Симбирка	G14	4,45	3,32	3,46	3,36	2,27	3,87	3,51	2,48	3,34
Ишеевская	G15	3,61	2,94	3,32	3,51	2,09	3,52	3,34	2,39	3,09
Л-503	G16	3,55	3,22	3,21	3,20	2,15	3,71	3,60	2,34	3,12
Землячка	G17	4,23	3,55	3,25	3,79	2,45	4,02	3,89	2,63	3,48
Экада 6	G18	4,55	3,55	3,32	3,92	2,37	3,70	3,55	2,26	3,40
Симбирцит	G2	5,04	3,97	3,76	3,89	2,23	4,53	4,14	2,87	3,80
Экада 70	G3	5,04	3,70	3,69	4,10	2,23	4,57	3,98	3,28	3,82
Маргарита	G4	4,95	3,74	3,74	4,10	2,05	4,82	3,78	3,15	3,79
Экада 109	G5	5,14	3,30	3,43	3,99	2,30	4,67	4,03	3,27	3,77
Ульяновская 100	G6	4,47	3,25	3,61	4,56	2,56	4,26	4,02	3,86	3,82
Ульяновская 105	G7	4,96	3,32	4,28	5,14	2,37	4,58	4,29	4,57	4,19
Бурлак	G8	4,94	3,69	4,28	4,15	2,15	5,05	4,60	4,82	4,21
Экада 214	G9	5,10	3,73	4,05	4,68	2,58	4,83	4,59	4,59	4,27
Никон	G10	5,22	4,33	4,25	4,58	2,44	4,97	4,70	4,79	4,41
Среднее по годам		4,38	3,33	3,50	3,88	2,24	4,08	3,83	3,05	3,54

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа выявили значительные различия в урожайности среди генотипов, сред и их взаимодействий. Основное влияние на изменчивость урожайности оказали условия среды (годы) – 48,14% от величины общей дисперсии. Вклад сорта составил 35,63%, взаимодействия «генотип × среда» – 11,63% (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа урожайности сортов яровой пшеницы (2017–2024 годы)

Источник варьирования	SS	Df	ms	$F_{факт.}$	$F_{таб.}$	Доля, %
Среда (E)	173,49	7	24,78	456,83	2,0	48,14
Сорт (G)	128,42	17	7,55	139,24	1,7	35,63
Взаимодействие (G×E)	41,92	119	0,35	6,49	1,3	11,63
Случайное	15,5	286	0,05	-	-	-

Две первые главные компоненты (PC1 и PC2), представленные на графике (рис. 1), объясняют 94,3% вариации, связанной с взаимодействием генотипа и среды.

Острые углы, образованные векторами среды, свидетельствуют о том, что, годы проведения исследований коррелировали между собой, даже при условии контрастности сложившихся агрометеорологических условий, что в первую очередь обусловлено закладкой опытов в одной агроэкологической точке. При этом, чем меньше угол между векторами среды, тем более схожи они по уровню формирования урожайности.

Большая длина вектора E8 (2024 год) позволила отнести его к наиболее информативной среде, вторым по дифференцирующей способности выступал 2022 году (E6). Наименьшей в эксперименте дифференцирующей способностью выделился 2021 году (E5). Информативность (разли-чительная способность) сред E3 (2019 год) и E7 (2023 год) была одинаковой.

Расположение векторов относительно метки идеальной тестовой среды, обозначенной точкой в центре концентрических кругов, показывает, что наиболее репрезентативными, но при этом малоинформативными, были условия 2019 (E3) и 2023 (E7) годы, векторы условий которых находятся ближе всего к средней оси AEA.

В рамках одной мегасреды генотипы необходимо оценивать, как по средней урожайности, так и по стабильности их проявления в различных условиях испытания.

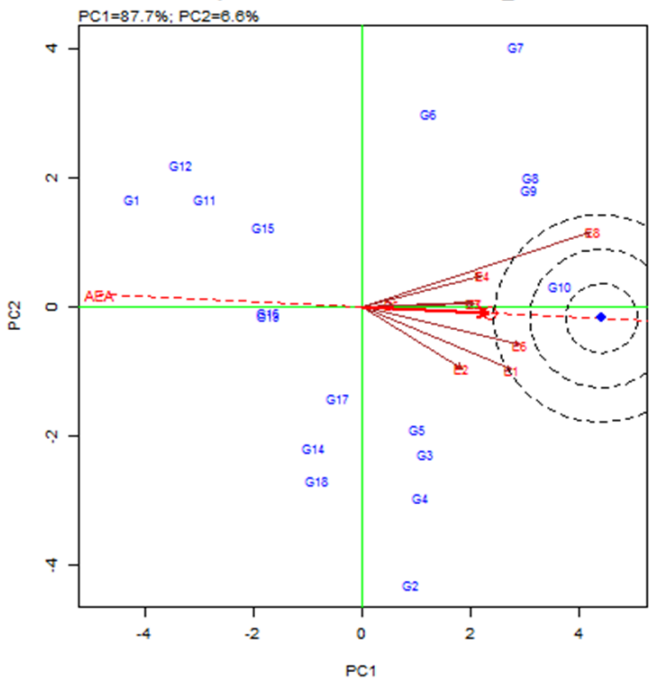


Рис. 1 – GGE biplot дифференцирующей способности и репрезентативности тестовых сред относительно «идеальной» среды

Расположение на линии продуктивности (абсцисса AEA) проекций маркеров показывает (рис. 2), что наибольшая в опыте урожайность в среднем по средам была у сорта Никон (G10). К началу линии, по убыванию урожайности от Никона, располагаются сорта Экада 214 (G9), Бурлак (G8), Ульяновская 105 (G7), Экада 70 (G3), Маргарита (G4), Симбирцит (G2), Ульяновская 100 (G6).

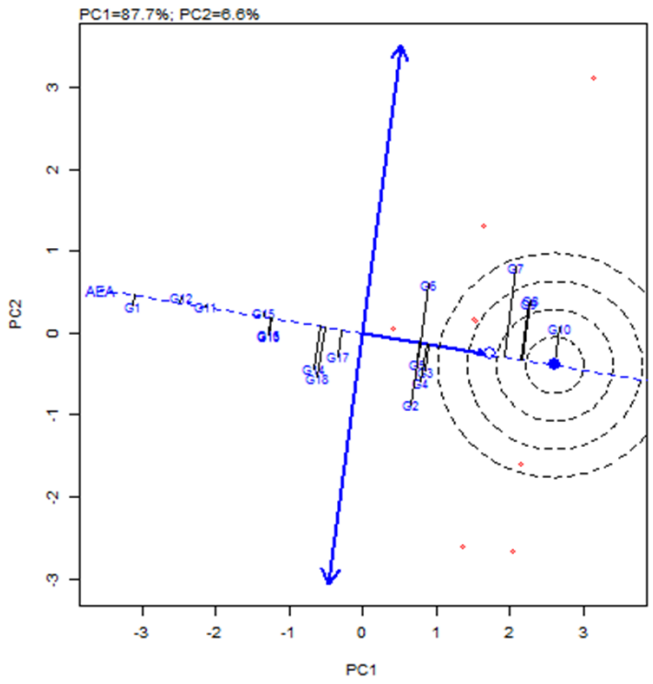


Рис. 2 – Biplot график урожайности и стабильности сортов яровой пшеницы относительно «идеального» генотипа

Сорта Лютесценс 62 (G1), Волжанка (G12), Саратовская 36 (G11), векторы которых расположены в начале линии продуктивности (AEA), формировали в среднем по анализируемым средам наименьшую в эксперименте урожайность. Эти три сорта представляют начальные этапы сортосмены культуры.

Стабильность сортов на графике оценивают по их отношению к абсциссе, относительно ординаты AEA (линия с двойной стрелкой).

Чем короче вектора генотипов, тем соответственно выше их стабильность, а чем дальше они расположены от этой линии, в одну или другую сторону – менее стабильными. В число сортов, характеризующихся пониженной стабильностью формирования урожайности, входят сорта различных периодов сортосмены, в том числе отнесенные к последним этапам: Ульяновская 105 (G7), Ульяновская 100 (G6), Симбирцит (G2). Более высокая стабильность среди современных сортов присуща следующим: Никон (G10), Бурлак (G8), Экада 214 (G9), Экада 109 (G5), Экада 70 (G3) и Маргарита (G4).

Концентрические круги на biplot графике урожайности и стабильности отображают ранжирование сортов по отношению к «идеальному» генотипу, который находится в центре в виде точки. По определению «идеальный» генотип должен сочетать в себе способность к реализации максимальной средней урожайности, с высокой её стабильностью, полученной в разных средах испытаний. Судя по графику, наиболее близко к параметрам «идеального» генотипа расположен сорт Никон, как с точки зрения продуктивности, так и стабильности. В зоне концентрических кругов находятся также сорта Бурлак и Экада 214, что позволяет отнести их к лучшим по адаптивности. При этом высокая стабильность имеет смысл только тогда, когда она связана с высокой средней урожайностью в анализируемых средах. Сорта Лютесценс 62, Волжанка, Саратовская 36 и Ишеевская, согласно их расположению на линии AEA, высокостабильны, однако их сортовая ценность гораздо ниже, по сравнению с расположенными в правой части графика, даже несмотря на то, что последние показывают меньшую стабильность.

Принимая во внимание, что в исследовании GGE biplot анализу были подвергнуты данные урожайности сортов, относящихся к разным периодам сортосмены яровой пшеницы, то об уровне урожайности и адаптивности «старых» и «новых» селекционных достижений можно судить по их расположению на биплоте. Сравнение длин векторов сортов, исходящих от линии AEA, показывает, что средний уровень стабильности у новых сортов ниже. При этом более высокие значения средней урожайности свидетельствуют об их большей ценности.

Рассмотрение взаимодействия генотип×среда у сортов, включенных в начальные периоды сортосмены, показывает, что у них низкая ожидаемая урожайность проявлялась во всех средах, тогда как у сортов последних периодов сортосмены векторы разнонаправлены. Это позволяет подбирать сорта, пригодные для использования в различных по интенсивности технологиях возделывания. Более того, такие сорта, как Никон, Бурлак и Экада 214 сочетают высокую потенциальную урожайность со стабильностью её формирования.

Подбор сортов, имеющих отличия по взаимодействию генотипа со средой, имеет значение для достижения стабилизации производства зерна. С использованием biplot анализа на двухмерном графике проведено сравнение сходства генотипов (рис. 3). На графике в центре расположен виртуальный генотип, имеющий среднюю урожайность в каждой из сред. Степень отличия анализируемых сортов от среднего виртуального генотипа по урожайности определяется длиной векторов.

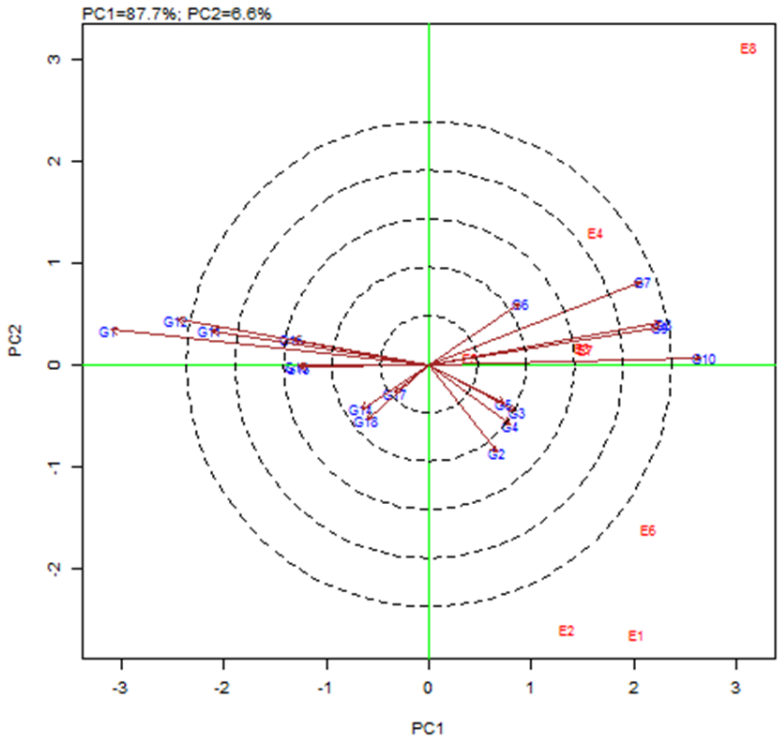


Рис. 3 – Двухмерный GGE biplot график сравнения сходства генотипов

Генотипы с длинными векторами выступают либо лучшими (G7, G8, G9, G10), либо худшими (G1, G11, G12), либо самыми нестабильными (G14, G18). Наименьшие острые углы между несколькими группами генотипов (G6, G7, G8, G9, G10; G2, G3, G4, G5; G14, G17, G18; G1, G11, G12, G15) отражают сходную реакцию у них на совокупность факторов внешней среды. Между векторами генотипов G7 и G1 образован тупой угол, что свидетельствует об их различной реакции на условия внешней среды.

В проведенных ранее исследованиях, нами, эмпирически было выделено в Ульяновской области шесть периодов сортосмены яровой мягкой пшеницы, начиная с первого сорта научной селекции – Лютесценс 62 [14]. Они разделены по морфотипу, использованию исходного материала при их создании и продолжительности возделывания в производстве. Селекционные достижения, включенные в пятый и шестой этапы, в последние годы широко используют в различных регионах России.

Визуализация GGE biplot анализа (рис. 3) дает основание в целом подтвердить верность эмпирического разделения сортов, составляющих сортосмену на периоды. Вместе с тем, полученные в этом исследовании результаты позволяют выявить близость отдельных сортов, отнесенных к одному периоду, к сортам, составляющим другой период по сходству взаимодействия «генотип – среда».

Например, сорт Экада 109 (G5) нами был включен в шестой период, однако biplot график сходства генотипов выявил его близость к сортам пятого периода Симбирцит, Экада 70, Маргарита (G2, G3, G4). Сорт Экада 6 (G18), по взаимодействию генотип×среда ближе к сортам 4 этапа сортосмены. Сорта Симбирка (G14) и Землячка (G17) показали высокую степень сходства (см. рис. 3), близкую стабильность и среднюю урожайность (см. рис. 2), но по времени допуска в производство отнесены к разным периодам. Результаты, представленные на графиках, выявили обоснованность выделения шестого этапа сортосмены. В него, по нашему мнению, необходимо включить сорта, различающиеся по биологическим особенностям, способные реализовать генетический потенциал продуктивности в благоприятных условиях, и проявлять высокую адаптивность в менее благоприятных. Реализация этого положения отчетливо прослеживается на приведенных рисунках. Поэтому введение дополнительного критерия деления на сортосмены, позволит в дальнейших исследованиях провести корректировку граничных сортов, включенных в тот, или иной этап.

GGE biplot «что где выиграло» – это расширенная функция парных сравнений, которая позволяет визуально определить преимущества различных генотипов в отдельных и групповых средах (рис. 4).

Генотипы, расположенные в вершинах многоугольника, сформированы либо лучшими, либо самыми худшими в одной или нескольких средах. На рисунке восемь анализируемых сред (годы), которые разделены на пять секторов, образующих мегасреды. Сорт Ульяновская 105 (G7) был лучшим в средах E4, E8, а сорт Никон (G10) в остальных средах, образовавших единую мегасреду, в сектор которой также входят генотипы G8, G9, G5 и G3.

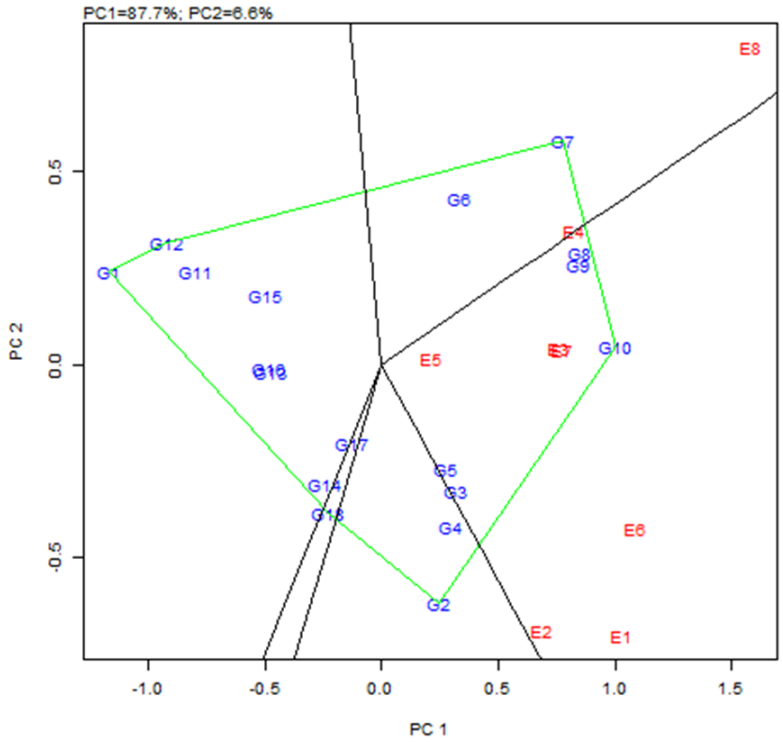


Рис. 4 – GGE biplot «кто где выиграл»

Генотипы, находящиеся в секторах без сред, уступают другим сортам по адаптивности.

Выводы. Основное влияние на изменчивость урожайности набора изучаемых сортов оказали условия среды (годы) – 48,14% от величины общей дисперсии. Вклад сорта составил – 35,63%, взаимодействия «генотип × среда» – 11,63%.

Наибольшая в опыте урожайность в среднем по всем анализируемым средам отмечена у сорта Никон, который наиболее близок к «идеальному» генотипу, как по продуктивности, так и стабильности, а наименьшая – у сортов, относящихся к начальным периодам сортосмены, Лютесценс 62, Волжанка, Саратовская 36 при высокой стабильности её формирования. Уровень стабильности новых сортов ниже, однако значительно более высокая средняя урожайность свидетельствует о их большей ценности.

Сравнение генотипов по сходству взаимодействия «генотип – среда» позволило подтвердить верность эмпирического разделения сортов, составляющих сортосмену, на периоды и может послужить дополнительным критерием распределения сортов.

Литература

1.Braun H.J., Atlin G., Payne T. Multi-location testing as a tool to identify plant response to global climate change // In:M. P. Reynolds (Eds.).Climate change and crop production, CABI climate change series. Surrey, UK. 2010. P. 115–138.doi: 10.1079/9781845936334.0115.

2.Галушко Н.А., Соколенко Н.И., Батагова Е. А. Адаптивные особенности новых сортов мягкой озимой пшеницы селекции ФГБНУ Северо-Кавказский ФНАЦ // Земледелие. 2023. №6. С.41–44. doi: 10.24412/0044-3913-2023-6-41-44.

3.Сапега В.А. Урожайность и параметры экологической пластичности среднеспелых сортов яровой пшеницы при их использовании по различным предшественникам // Земледелие. 2017. № 4. С. 34–36.

4.Сафонова И.В., Аниськов Н.И. Эффективность использования некоторых критериев определения адаптивности на примере сортов озимой ржи // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. № 184 (2). С. 66-75. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-66-75.

5.Величина и стабильность урожайности современного селекционного материала яровой твердой пшеницы (Triticum durum Desf.) из России и Казахстана / П.Н. Мальчиков, М.А. Розова, А.И. Моргунов и др.// Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. № 22(8). С. 939–950. doi: 10.18699/VJ18.43.

6.Иващенко В.Г., Павлюшин В.А. Интенсификация растениеводства и эколого-продукционный баланс агроэкосистем: снижение плодородия почв и фитосанитарная дестабилизация // Вестник защиты растений. 2017. № 3(93). С. 5-16

7.Гудзенко В.Н. Статистическая и графическая (GGE biplot) оценка адаптивной способности и стабильности селекционных линий ячменя озимого // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. №23(1). С. 110-118. doi: 10.18699/VJ19.469.

8.Мальчиков П. М., Мясникова М. Г., Чахеева Т. В. Графический (с применением GGE biplot методов) анализ урожайности и её стабильности в процессе селекции яровой твердой пшеницы в Среднем Поволжье // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. №6. С. 11–16. doi: 10.53859/02352451_2022_36_6_11.

9.GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype – by - environment data / W. Yan, M.S. Kang, B. Ma, et al. // Crop Science. 2007. Vol. 47. P. 643–655.doi:10.2135/cropsci2006.06.0374.

10.Пономарев С.Н., Пономарева М. Л., Тагиров М.Ш. Оценка фенотипической стабильности сортов озимой тритикале по урожайности зерна методом биплот-анализа // Земледелие. 2018. № 8. С. 34–38. doi: 10.24411/0044- 3913-2018-10810.

11.Siddi S., Anil D., Lingaiah N. GGE biplot analysis for stability in diverse maturity groups of rice (Oryza sativa L.) advanced lines // International Journal of Bio-Resource & Stress Management. 2022. Vol. 13.No. 1. P.114–121. doi :23910/1.2022.2597.

12.Мальчиков П.Н., Мясникова М.Г. Урожайность зерна селекционных линий яровой твердой пшеницы, созданных в селекционных центрах России в условиях Самарского НИИСХ // Зернобобовые и крупяные культуры. 2024. № 4(52). С. 128–138. doi: 10.24412/2309- 348X-2024-4-128-138.

13.Федин М.А. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. М.: ВНИИСХ им. В. Р. Вильямса, 1989. Вып. 2. 194 с.

14.Захаров В.Г., Яковлева О. Д. Результативность селекции яровой мягкой пшеницы на повышение урожайности (на примере сортосмены по Ульяновской области) // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 3(47). С. 59–65. doi: 10.18286/1816-4501-2019-3-59-65.

Сведения об авторах:

Захаров Владимир Григорьевич – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела селекции, e-mail: ulniish@mail.ru

Яковлева Оксана Дмитриевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела селекции, e-mail: jakovleva_niish@mail.ru

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Ульяновский НИИСХ – филиал СамНЦ РАН, пос. Тимирязевское, Ульяновская обл., Россия.

ASSESSMENT OF ADAPTABILITY OF SPRING WHEAT VARIETIES AT DIFFERENT VARIETY MATCHING PERIODS USING GGE BIPLOT ANALYSIS

V. G. Zakharov, O. D. Yakovleva

Abstract. Increasing yield potential is one of the most significant areas of breeding. The purpose of research was to evaluate the productivity and adaptability of spring soft wheat varieties at different breeding periods using GGE biplot analysis and to identify representative and differentiating environments (years). The study was carried out from 2017 to 2024 in Middle Volga region, using a model set of 18 spring soft wheat varieties representing the variety changeover

period in Ulyanovsk region. Environmental conditions (years) had the primary influence on yield variation, explaining 48.14% of the variance. The second most significant contribution was from the variety, accounting for 35.63%. The interaction "genotype × environment" had the smallest effect on yield variability in the experiment – 11.63%. GGE biplot analysis assessing yield, adaptability and stability revealed that Nikon, Burlak and Ekada 214 varieties, included in the State Register in recent years, are highly valuable. This is due to their ability to realize genetically high yield potential combined with the stability of yield formation across a wide range of weather and climate conditions, unlike varieties from earlier periods of variety rotation – Lutestsens 62, Saratovskaya 36 and Volzhanka. Nikon variety demonstrated the highest average yield over the years of research (4.41 t/ha). Biplot analysis revealed its closeness to the "ideal" genotype in terms of productivity and stability. In descending order of yield from Nikon, the following varieties are listed: Ekada 214 (4.27 t/ha), Burlak (4.21 t/ha), Ulyanovskaya 105 (4.19 t/ha), Ekada 70 (3.82 t/ha), Margarita (3.79 t/ha), Simbirtsit (3.80 t/ha) and Ulyanovskaya 100 (3.82 t/ha).

Key words: spring soft wheat *(Triticum aestivum L.)*, variety, variety rotation, yield, stability, genotype, mega-environment.

References

1. Braun HJ, Atlin G, Payne T. Multi-location testing as a tool to identify plant response to global climate change. In:M. P. Reynolds (Eds.). Climate change and crop production, CABI climate change series. Surrey. UK. 2010; 115-138 p. doi: 10.1079/9781845936334.0115.

2. Galushko NA, Sokolenko NI, Batagova EA. [Adaptive features of new varieties of soft winter wheat bred by North Caucasus Federal Scientific Center]. Zemledelie. 2023; 6. 41-44 p. doi: 10.24412/0044-3913-2023-6-41-44.

3. Sapega VA. [Productivity and parameters of ecological plasticity of mid-season spring wheat varieties when using them on different predecessors]. Zemledelie. 2017; 4. 34-36 p.

4. Safonova IV, Aniskov NI. [Efficiency of using some criteria for determining adaptability on the example of winter rye varieties]. Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2023; 184 (2). 66-75 p. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-66-75.

5. Malchikov PN, Rozova MA, Morgunov AI. [The magnitude and stability of the yield of modern breeding material of spring durum wheat *(Triticum durum Desf.)* from Russia and Kazakhstan]. Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii. 2018; 22(8). 939-950 p. doi: 10.18699/VJ18.43.

6. Ivashchenko VG, Pavlyushin VA. [Intensification of crop production and ecological and productive balance of agroecosystems: reduction of soil fertility and phytosanitary destabilization]. Vestnik zashchity rasteniy. 2017; 3(93). 5-16 p.

7. Gudzenko VN. [Statistical and graphical (GGE biplot) assessment of adaptive capacity and stability of winter barley breeding lines]. Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii. 2019; 23(1). 110-118 p. doi: 10.18699/VJ19.469.

8. Malchikov PM, Myasnikova MG, Chakheeva TV. Graphic (using GGE biplot methods) analysis of yield and its stability in the process of breeding spring durum wheat in Middle Volga region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022; Vol.36. 6. 11-16 p. doi: 10.53859/02352451_2022_36_6_11.

9. Yan W, Kang MS, Ma B. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype – by – environment data. Crop Science. 2007; Vol.47. 643-655 p. doi:10.2135/cropsci2006.06.0374.

10. Ponomarev SN, Ponomareva ML, Tagirov MSh. [Evaluation of phenotypic stability of winter triticale varieties for grain yield by biplot analysis]. Zemledelie. 2018; 8. 34-38 p. doi: 10.24411/0044- 3913-2018-10810.

11. Siddi S, Anil D, Lingaiah N. GGE biplot analysis for stability in diverse maturity groups of rice *(Oryza sativa L.)* advanced lines. International Journal of Bio-Resource & Stress Management. 2022; Vol.13. No.1. 114-121 p. doi :23910/1.2022.2597.

12. Malchikov PN, Myasnikova MG. [Grain yield of spring durum wheat breeding lines developed in Russian breeding centers of Samara Research Institute of Agriculture]. Zernobobovye i krupyanye kultury. 2024; 4(52). 128-138 p. doi: 10.24412/2309- 348X-2024-4-128-138.

13. Fedin MA. [Methodology of state variety testing of agricultural crops]. Zernovye, krupyanye, zernobobovye, kukuruza i kormovye kul'tury. Moscow: VNIISKh im. V.R.Vilyamsa. 1989; issue 2. 194 p.

14. Zakharov VG, Yakovleva OD. [Effectiveness of spring soft wheat breeding to increasing of yield (using variety change in Ulyanovsk region as an example)]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2019; 3(47). 59-65 p. doi: 10.18286/1816-4501-2019-3-59-65.

Authors:

Zakharov Vladimir Grigorevich – Doctor of Agricultural Sciences, chief researcher of Selection Department, e-mail: ulniish@mail.ru

Yakovleva Oksana Dmitrievna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Selection Department, e-mail: jakovleva_niish@mail.ru

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture - branch of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Timiryazevskoe settlement, Ulyanovsk region, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-39-46
УДК 661.169.2

РОСТОСТИМУЛИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ МИКРООРГАНИЗМОВ И ХИМИЧЕСКИХ ФУНГИЦИДОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ПРИМЕНЕНИИ НА ТОМАТАХ

Л. З. Каримова, Ш. З. Валидов, Г. Ф. Рахманова, А. Р. Валиев

Реферат. Исследование проводили с целью оценки ростостимулирующей активности штаммов микроорганизмов и их комбинаций с действующими веществами синтетических препаратов на растениях томата для разработки комплексных биопестицидных композиций, обеспечивающих эффективную защиту растений при уменьшении химической нагрузки на агроэкосистемы. Работу выполняли в 2025 году в лабораторных и вегетационных условиях с фиксацией биометрических показателей на 30-й, 60-й и 90-й день. Использовали штаммы микроорганизмов *Pseudomonas aureofaciens* BS 1393, *Pseudomonas fluorescens* WCS 365, *Pseudomonas putida* PCL 1760, *Trichoderma asperellum* T302, химические фунгициды мандипропамид, дифеноконазол и их сочетания с микроорганизмами на томатах сорта Хурма. Пестициды использовали в сниженных концентрациях (в 2 раза меньше доз, рекомендуемых производителем). Установлено статистически значимое положительное влияние всех биологических агентов на рост и продуктивность томатов. Наибольший в опыте эффект в чистом виде проявил штамм *T. asperellum* T302, обеспечивший увеличение высоты стебля относительно контроля на 145,8%, средней массы плода – на 22,5%. Выявлен синергетический эффект при комбинированном применении изучаемых средств: сочетание мандипропамида с *P. putida PCL* 1760 увеличивало длину корня, по сравнению с использованием препарата в чистом виде, на 65,7% (5,8 см против 3,5 см) и обеспечило формирование плодов с максимальной в опыте массой (228,2 г, +24,4% к контролю), дифеноконазол с *P. aureofaciens* BS 1393 – стабильное плодоношение (3 плода на кисти). Подтверждена способность биоагентов снижать фитотоксичность химических препаратов, а также возможность их использования при таком сочетании в половинных дозах без потери эффективности. Результаты экспериментов демонстрируют перспективность разработки комплексных биопестицидных композиций для экологизации защиты растений.

Ключевые слова: томат (*Solanum lycopersicum*), ростостимулирующие ризобактерии (PGPR), *Pseudomonas aureofaciens*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*, *Trichoderma asperellum*, биологический контроль, мандипропамид, дифеноконазол, синергетический эффект, экологизация сельского хозяйства.

Введение. Современное сельское хозяйство сталкивается с необходимостью разработки устойчивых стратегий защиты растений, которые могли бы обеспечить продовольственную безопасность при одновременном снижении химической нагрузки на агроэкосистемы. Интеграция пестицидов и биологических агентов становится ключевым подходом в создании эффективных комплексных технологий защиты растений, что подтверждается многочисленными научными исследованиями последнего десятилетия [1, 2, 3].

Актуальность этой темы обусловлена возрастающей проблемой пестицидной резистентности фитопатогенов, ужесточением экологических требований к сельскохозяйственному производству и растущим спросом на органическую продукцию. По данным исследований [4, 5], рынок биопрепаратов ежегодно увеличивается на 15…17%, что отражает глобальный тренд на экологизацию сельского хозяйства.

Биологические агенты защиты растений, в частности микроорганизмы, стимулирующие рост растений (PGPR), представляют собой важнейший компонент плодородия почвы и здоровья растений. Они способны не только повышать урожайность и питательные качества сельскохозяйственных культур [6, 7], но и обеспечивать защиту от фитопатогенов через множество механизмов, включая конкуренцию за питательные вещества, продукцию антибиотиков и индукцию системной устойчивости растений [8, 9].

Особый интерес представляют ризосферные бактерии рода *Pseudomonas*, которые обладают целым рядом физиолого-биохимических особенностей, делающих их перспективными объектами агробиотехнологии. Как отмечено в работах российских учёных, эти бактерии способны не только подавлять патогенную микрофлору, но и стимулировать рост растений через синтез фитогормонов и улучшение доступности питательных веществ [10, 11]. Исследования также показывают, что *Trichoderma spp.* выступают эффективными биоконтрольными агентами благодаря множеству механизмов антагонизма, включая микопаразитизм, конкуренцию за пространство и питательные вещества, а также индукцию защитных реакций растений [12].

Несмотря на очевидные преимущества биологических агентов, их эффективность в полевых условиях часто ограничена из-за влияния абиотических факторов и сложных взаимодействий в почвенной микробиоте. В этом контексте интеграция биологических агентов с химическими пестицидами представляется перспективным подходом, позволяющим повысить эффективность защиты растений при одновременном снижении дозировок химических препаратов [13, 14].

То есть, исследование возможностей совмещения пестицидов и биопрепаратов для

защиты и стимуляции роста растений не только отвечает на актуальные вызовы современного сельского хозяйства, но и открывает новые горизонты для создания эффективных, экологически безопасных технологий защиты растений в контексте устойчивого развития агроэкосистем. Как было показано нами ранее [15], комбинированное применение химических фунгицидов и микроорганизмов-антагонистов обеспечивает синергетический эффект, позволяя существенно снизить дозы химических препаратов при сохранении эффективности против фузариозной инфекции. В частности, летучие соединения штаммов *P. fluorescens* WCS 365 и *P. putida* PCL 1760 снизили прорастание конидий *Fusarium oxysporum f.sp. radicis-lycopersici* с 70,1% в контроле до 10,8…4,2% в опытах, а комбинация дифеноконазола с *P.aureofaciens* BS 1393 усилила рост корневой системы томатов на 108,9% даже при использовании сниженных концентраций фунгицида. Продолжая это направление исследований, мы сосредоточились на изучении влияния указанных комбинаций на биометрические показатели и продуктивность томатов в вегетационном опыте.

Цель исследования – оценить ростостимулирующую активность штаммов микроорганизмов и их комбинаций с действующими веществами синтетических препаратов на растениях томата для разработки комплексных биопестицидных композиций, обеспечивающих эффективную защиту растений при уменьшении химической нагрузки на агроэкосистемы.

Задачи исследования:

изучить влияние совместного применения синтетических пестицидов и биопрепаратов на биометрические показатели и физиологическое состояние растений томата, в том числе в условиях патогенной нагрузки;

определить оптимальные комбинации и концентрации химических пестицидов и биоагентов для разработки композиций, обеспечивающих эффективную защиту растений при сниженных дозах синтетических компонентов;

оценить антистрессовый эффект биологических агентов при совместном применении с химическими пестицидами и их способность снижать фитотоксичность химических компонентов для культурных растений.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов на базе ФИЦ КазНЦ РАН (г. Казань, Россия) в вегетационный период 2025 году.

Использовали перспективные штаммы микроорганизмов с различными механизмами антагонизма к фитопатогенам:

Pseudomonas aureofaciens BS 1393 – активный колонизатор корней растений и продуцент феназиновых антибиотиков, действует как агент биологической защиты растений, используя механизм антибиозиса;

Pseudomonas fluorescens WCS 365 – активно колонизирует корневую систему растений и служит агентом их биологической защиты, механизм действия связан с индукцией системной устойчивости растений;

Trichoderma asperellum T302 – функционирует как агент биологической защиты растений, на основе паразитизма и хищничества по отношению к фитопатогенам;

Pseudomonas putida PCL 1760 – активно колонизирует корни растений и защищает их, используя механизм конкуренции за экологические ниши.

В качестве модельного фитопатогена использовали *Fusarium oxysporum f.sp. radicis-lycopersici* ZUM 2407 (*Forl* ZUM 2407), который вызывает корневые гнили томата.

В эксперименте применяли два химических фунгицида: мандипропамид – представитель класса манделамидов, и дифеноконазол – триазольный компонент системного действия.

Концентрации пестицидов при использовании уменьшали, по сравнению с рекомендуемыми производителем, в 2 раза: дифеноконазол – 2 мл на 5 л воды (вместо 4 мл/5 л), мандипропамид – 2,5…3,0 мл на 5 л воды (вместо 5…6 мл/5 л).

В качестве тест-культуры использовали томат (*Solanum lycopersicum*) сорта Хурма – среднеранний детерминантный сорт с плоско-округлыми желто-оранжевыми плодами (урожайность 4…5 кг с 1 растения). Сорт отличается восприимчивостью к фитофторозу и макроспориозу, что делает его подходящим для оценки эффективности защитных мероприятий [15].

Схема вегетационного опыта включал 15 вариантов обработки растений, которые были разделены на три группы. Первая группа состояла из пяти вариантов, в которых оценивали действие биопрепаратов в чистом виде. В качестве контроля использовали воду. Четыре остальных варианта предусматривали опрыскивание растений культурами штаммов *Pseudomonas aureofaciens* BS 1393, *Pseudomonas fluorescens* WCS 365, *Trichoderma asperellum* T302 и *Pseudomonas putida* PCL 1760. Вторая и третья группы включали по пять вариантов применения соответственно мандипропамида и дифеноконазола (в чистом виде и четырех комбинациях с каждым из изучаемых четырёх штаммов микроорганизмов).

При закладке семян для проращивания использовали одноразовые кассеты для рассады и готовый торфяной почвогрунт, в каждую ячейку помещали по одному семени. Семена обрабатывали жидкими культурами штаммов с известным титром, инокуляцию проводили в стерильных фальконах. Растения выращивали в климатостате КС-200 СПУ с заданной программой смены температуры – днем 23°С, ночью 18°С, при влажности почвы 60…70% от полной влагоёмкости, влажности

воздуха 50…60% в условиях 16-часового светового дня в течение 30 суток. Обработку вегетирующих растений осуществляли через 14 суток после всходов, путем опрыскивания согласно схеме опыта.

В вегетационных опытах рассаду томатов высаживали в сосуды с черноземным субстратом. Влажность почвы в период вегетации поддерживали в пределах 70…75% от полной полевой влагоемкости. Обработку растений исследуемыми консорциумами микроорганизмов и химическими средствами проводили согласно схеме опыта путем опрыскивания в фазе формирования 3…4 листьев.

Метеорологические условия вегетационного периода отличались определенной нестабильностью. В мае отмечена среднемесячная температура +15°С, что соответствовало климатической норме. Июнь характеризовался повышенной среднемесячной температурой в пределах +17...18°С, при норме +15°С. При этом месяц можно условно разделить на две контрастные части: жаркую первую половину и прохладную вторую. Июль начался с температурных значений на 1,5…2,0°С ниже нормы (+20,3°С), однако со второй половины месяца произошло существенное потепление с повышением температуры до +30°С и выше. В августе отмечали резкие и продолжительные понижения температуры, пришедшиеся на критические фазы цветения и формирования плодов, которые оказали особенно неблагоприятное воздействие на рост и развитие томатов.

В ходе эксперимента определяли высоту стебля и длину корня, а также их сухую массу. Помимо этого проводили учет количества цветков (завязей) и плодов в динамике на протяжении вегетационного периода с фиксацией данных на 30-й, 60-й и 90-й день.

Все опыты проводили в трехкратной повторности. Статистическую обработку результатов осуществляли методом дисперсионного анализа с расчётом наименьшей существенной разности (НСР05) при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Все штаммы микроорганизмов (табл. 1) достоверно увеличивали высоту растений томата, по сравнению с контролем (4,8 см). Максимальный в опыте эффект обеспечил *T. asperellum* Т302, увеличив высоту стебля до 11,8 см (+145,8%), что превосходит контроль на 7,0 см. *P. aureofaciens* BS 1393 и *P. fluorescens* WCS 365 продемонстрировали сопоставимые результаты (соответственно 10,2 и 10,3 см, +112,5% и +114,6%). Использование *P. putida* PCL 1760 приводило к менее выраженному, но все еще значительному эффекту (8,6 см, +79,2%).

Таблица 1 – Биометрические показатели томатов при обработке биологическими объектами защиты растений в лабораторных условиях

Вариант	Высота стебля, см	Длина корня, см	Сухая масса стебля, г/растение	Сухая масса корня, г/растение
Вода (контроль)	4,8	2,7	0,0243	0,0109
P. aureofaciens BS 1393	10,2	4,0	0,1952	0,0670
P. fluorescens WCS 365	10,3	3,7	0,2286	0,0286
T. asperellum Т302	11,8	4,3	0,3350	0,0266
P. putida PCL 1760	8,6	3,6	0,2280	0,0831
$НСР_{05}$	0,4	0,3	0,1700	0,0100

Максимальное в опыте развитие корней также обеспечил штамм *T. asperellum* Т302, увеличив их длину до 4,3 см (+59,3% к контролю). При использовании штаммов *P. aureofaciens* BS 1393, *P. fluorescens* WCS 365, *P. putida* PCL 1760 величина этого показателя возрастала соответственно на 48,1, 37,0 и 33,3%.

Применение всех штаммов способствовало кратному увеличению биомассы надземной части. Максимальное ее накопление – 0,3350 г, что превышало контрольное значение (0,0243 г) в 13,8 раза, отмечено в варианте с *T. asperellum* Т302. При использовании *P. fluorescens* WCS 365 и *P. putida* PCL 1760 биомасса стебля увеличилась в 9,4 раза (до 0,2286 г и 0,2280 г соответственно), *P. aureofaciens* BS 1393 – в 8,0 раз (до 0,1952 г).

Наибольшую стимуляцию накопления корневой биомассы обеспечил штамм *P. putida* PCL 1760, увеличив сухую массу корней до 0,0831 г, что в 7,6 раза превышало контроль (0,0109 г). Использование *P. aureofaciens* BS 1393 также способствовало значительному увеличению (0,0670 г, в 6,1 раза), а обработка *T. asperellum* Т302 и *P. fluorescens* WCS 365 приводила к более умеренному росту – в 2,4 и 2,6 раза соответственно.

При совместном применении мандипропамида с микроорганизмами выявлена четкая специфичность взаимодействия (табл. 2). Штамм *P. putida* PCL 1760 продемонстрировал универсальный синергетический эффект, обеспечив формирование максимальной в опыте длины корня (5,8 см, +114,8% к контролю) и высоты стебля (10,0 см, +108,3%) с сухой массой 0,3210 г (в 13,2 раза больше контроля).

Таблица 2 – Биометрические показатели томатов в зависимости от применения мандипропамида с биологическими объектами защиты растений в лабораторных условиях

Вариант	Высота стебля, см	Длина корня, см	Сухая масса стебля, г/ растение	Сухая масса корня, г/ растение
Вода (контроль)	4,8	2,7	0,0243	0,0109
Мандипропамид	9,4	3,5	0,1071	0,0226
Мандипропамид + *P. aureofaciens* BS 1393	9,6	5,2	0,2750	0,0624
Мандипропамид + *P. fluorescens* WCS 365	8,3	4,5	0,3043	0,0329
Мандипропамид + *T. asperellum* T302	9,6	3,7	0,2387	0,0343
Мандипропамид + *P. putida* PCL 1760	10,0	5,8	0,3210	0,0538
$НСР_{05}$	0,4	0,3	0,1300	0,0100

P. aureofaciens BS 1393 способствовал наибольшему развитию корневой системы. При его использовании длиной корня достигала 5,2 см (+92,6%), сухая масса корней – 0,0624 г (в 5,7 раза больше контроля). Применение *P. Fluorescens* WCS 365 обеспечило максимальное в опыте накопление биомассы стеблей (0,3043 г, в 12,5 раза), однако продемонстрировало антагонизм по высоте стебля (8,3 см, на 11,7% ниже, чем при мандипропамиде в чистом виде).

В варианте с *T. asperellum* T302 отмечено наименьшее в сочетании с мандипропамидом синергетическое влияние на развитие корней – +37,0%), что на 22…56% ниже других комбинаций. Применение мандипропамида в чистом виде приводило к наиболее слабому воздействию на корневую систему (3,5 см, сухая масса 0,0226 г – в 2,1 раза больше контроля).

Совместное применение дифеноконазола с микроорганизмами продемонстрировало менее выраженную синергию, чем при использовании мандипропамида (табл. 3). Наилучший в опыте результат показал *P. aureofaciens* BS 1393, обеспечив максимальную в опыте высоту стебля (9,3 см, +93,8% к контролю, +8,1% к чистому дифеноконазолу), длину корня (3,6 см, +33,3%), биомассу стеблей (0,2004 г, в 8,2 раза больше контроля) и корней (0,0585 г, в 5,4 раза).

Таблица 3 – Биометрические показатели томатов в зависимости от применения дифеноконазола с биологическими объектами защиты растений в лабораторных условиях

Вариант	Длина стебля, см	Длина корня, см	Сухая масса стеблей, г	Сухая масса корней, г
Вода (контроль)	4,8	2,7	0,0243	0,0109
Дифеноконазол	8,6	3,1	0,1118	0,0220
Дифеноконазол + *P. aureofaciens* BS 1393	9,3	3,6	0,2004	0,0585
Дифеноконазол + *P. fluorescens* WCS 365	7,5	3,0	0,1114	0,0312
Дифеноконазол + *T. asperellum* T302	8,8	3,3	0,1014	0,0250
Дифеноконазол + *P. putida* PCL 1760	8,4	3,1	0,0859	0,0168
$НСР_{05}$	0,3	0,2	0,0600	0,0100

Использование *P. fluorescens* WCS 365 с дифеноконазолом приводило к уменьшению высоты стебля до 7,5 см, что на 12,8% ниже, чем в контроле и в варианте с пестицидом в чистом виде, при этом длина корня оставалась на уровне контроля (3,0 см). *T. asperellum* T302 показал умеренный эффект (высота 8,8 см, длина корня 3,3 см, биомасса стеблей 0,1014 г), который был ниже, чем в комбинации с мандипропамидом.

При сочетании дифеноконазола с *P. putida* PCL 1760 отмечен самый худший результат: высота стебля – 8,4 см, длина корня – 3,1 см, биомасса стеблей – 0,0859 г (все показателя на уровне или ниже варианта с препаратом в чистом виде). Сухая масса корней (0,0168 г) оказалась меньше, чем в контроле, на 54,1%. Это контрастирует с выраженным синергетическим эффектом штамма *P. putida* PCL 1760 при применении мандипропамида.

В условиях вегетационного опыта (табл. 4) наиболее выраженный в опыте эффект обеспечила обработка *T. asperellum* T302 и *P. fluorescens* WCS 365, где высота растений достигала 97,6 и 97,4 см соответственно, что на 6,9 и 6,7% превышает контроль (91,3 см). Это свидетельствует о выраженном ростостимулирующем эффекте указанных штаммов, вероятно, связанном с их способностью синтезировать фитогормоны и улучшать минеральное питание растений.

Таблица 4 – Биометрические показатели томатов при обработке биологическими объектами защиты растений в вегетационном опыте

Вариант	Высота растения, см	Количество цветков (завязей) и плодов на одной кисти, шт.			Масса одного плода, г
		(30-й день вегетации)	(60-й день вегетации)	(90-й день вегетации)	
Вода (контроль)	91,3	1	1	1	183,5
P. aureofaciens BS 1393	96,6	1	1	1	210,4
P. fluorescens WCS 365	97,4	3	1	1	212,7
T. asperellum T302	97,6	3	2	2	224,7
P. putida PCL 1760	96,1	2	2	2	215,8
$НСР_{05}$	2,0	-	-	-	2,0

Особый интерес представляют данные по формированию генеративных органов. Обработка штаммами *T. asperellum* T302 и *P. fluorescens* WCS 365 привела к трехкратному увеличению количества цветков (завязей) на 30-й день вегетации, по сравнению с контролем. Этот эффект может быть обусловлен оптимизацией физиологических процессов в растениях под влиянием метаболитов исследуемых микроорганизмов. Примечательно, что в последующие фазы развития (60-й и 90-й дни вегетации) преимущество наблюдали за вариантами с применением *T. asperellum* T302 и *P. putida* PCL 1760, где отмечено стабильное плодоношение (2 плода на кисти в оба срока наблюдений). При обработке *P. fluorescens* WCS 365, несмотря на максимальное число завязей (3 шт.), на кистях осталось по 1 плоду, что указывает на слабое завязывание при обилии цветков.

Наиболее значимо с практической точки зрения влияние микробиологических препаратов на массу плодов. Все исследуемые микроорганизмы достоверно повышали величину этого показателя, однако максимальный в опыте эффект зафиксирован в варианте с применением *T. asperellum* T302, где средняя масса плода составила 224,7 г, что на 22,5% превышало контрольные значения (183,5 г).

Результаты опытов свидетельствуют, что штамм *T. asperellum* T302 характеризуется наибольшей эффективностью по всему комплексу изученных параметров, включая высоту растений, количество плодов и их массу. Это согласуется с литературными данными о множественных механизмах действия грибов рода *Trichoderma*, включающих не только антагонистическую активность в отношении фитопатогенов, но и стимуляцию роста растений через синтез фитогормонов и индукцию системной устойчивости. Штамм *P. fluorescens* WCS 365 оказал наибольшее влияние на ранних этапах развития растений (высота, количество цветков), тогда как *P. putida* PCL 1760 более эффективно стимулировал формирование плодов (60-й день вегетации). Это может иметь практическое значение при выборе микробиологических препаратов для определенных фаз вегетации томатов.

Совместное применение химических фунгицидов в сниженных дозах с биологическими агентами обеспечило синергетический эффект, значительно превосходящий действие чистых химических препаратов по всем исследуемым показателям (табл. 5 и 6).

Таблица 5 – Биометрические показатели томатов в зависимости от применения мандипропамида в сочетании с биологическими объектами защиты растений в вегетационном опыте

Вариант	Высота растения, см	Количество цветков (завязей) и плодов на одной кисти, шт.			Масса одного плода, г
		(30-й день вегетации)	(60-й день вегетации)	(90-й день вегетации)	
Вода (контроль)	91,3	1	1	1	183,5
Мандипропамид	88,1	2	1	1	184,3
Мандипропамид + *P. aureofaciens* BS 1393	96,1	1	1	1	204,1
Мандипропамид + *P. fluorescens* WCS 365	96,6	3	1	1	212,8
Мандипропамид + *T. asperellum* T302	95,4	2	2	2	208,1
Мандипропамид + *P. putida* PCL 1760	98,4	3	1	1	228,2
$НСР_{05}$	1,7	-	-	-	1,9

Таблица 6 – Биометрические показатели томатов в зависимости от применения дифеноконазола в сочетании с биологическими объектами защиты растений в вегетационном опыте

Вариант	Высота растения, см	Количество цветков (завязей) и плодов на одной кисти, шт.			Масса одного плода, г
		(30-й день вегетации)	(60-й день вегетации)	(90-й день вегетации)	
Вода (контроль)	91,3	1	1	1	183,5
Дифеноконазол	86,1	1	1	1	184,8
Дифеноконазол + *P. aureofaciens* BS 1393	96,9	3	3	3	218,3
Дифеноконазол + *P. fluorescens* WCS 365	94,3	1	1	1	208,0
Дифеноконазол + *T. asperellum* T302	92,2	2	1	1	200,5
Дифеноконазол + *P. putida* PCL 1760	95,4	2	1	1	203,7
$НСР_{05}$	1,8	-	-	-	1,8

Все испытанные комбинации обеспечили статистически достоверное увеличение высоты растений, по сравнению с контролем и вариантами с применением только химических фунгицидов. Наиболее выраженное стимулирующей влияние на рост растений оказали комбинации: мандипропамид + *P. putida* PCL 1760 (98,4 см) – превышение контроля на 10,3 см (11,7%) и дифеноконазол + *P. aureofaciens* BS 1393 (96,9 см) – превышение контроля на 10,8 см (12,5%).

В варианте дифеноконазол + *P. aureofaciens* BS 1393 отмечали стабильно большое количество цветков/плодов (3 шт.) на протяжении всего периода наблюдений, что втрое выше, чем в контроле и применении фунгицида в чистом виде. При использовании мандипропамида высокое количество цветков (3 шт.) отмечено на 30-й день в вариантах с *P. fluorescens* WCS 365 и *P. putida* PCL 1760, однако к 90-му дню повышенное количество плодов (2 шт.) отмечено только в варианте мандипропамид + *T. asperellum* T302. Эти результаты показывают, что комбинация с дифеноконазолом обеспечивает более стабильное плодоношение, тогда как комбинации с мандипропамидом стимулируют более активное цветение на ранних этапах развития.

Все испытанные комбинации способствовали значимому увеличению массы плодов, по сравнению с контролем (183,5 г) и вариантами с фунгицидами в чистом виде. Наибольший в опыте эффект отмечени в вариантах мандипропамид + *P. putida* PCL 1760 – 228,2 г (превышение контроля на 24,4%), дифеноконазол + *P. aureofaciens* BS 1393 – 218,3 г (+18,9%) и мандипропамид + *P. fluorescens* WCS 365 – 212,8 г (+16,0%). При этом штаммы, лучше стимулировавшие рост растений, обеспечили максимальное в опыте увеличение массы плодов, что подтверждает комплексное положительное влияние этих комбинаций на продуктивность томатов.

Выводы. Максимальный в опыте ростостимулирующий эффект обеспечило использование штаммов *T. asperellum* T302 и *P. putida* PCL 1760. В лабораторных условиях инокуляция *T. asperellum* T302 приводила к увеличению высоты стебля на 145,8% (11,8 см против 4,8 см контроля), сухой массы – в 13,8 раза. В вегетационном опыте штамм обеспечил увеличение высоты растения на 6,9% (97,6 см), количества цветков – в 3 раза, с формированием наибольшей массы плода – 224,7 г (+22,5%). *P. putida* PCL 1760 сильнее влиял на развитие корневой системы (в 7,6 раза больше, чем в контроле) и стабильное плодоношение (2 плода на кисти на протяжении 60…90 дней вегетации).

Комбинированное применение биоагентов со сниженной в 2 раза дозой мандипропамидом обеспечивает выраженный синергетический эффект. Совместное использование с синтетическим фунгицидом *P. putida* PCL 1760 увеличивало длину корня, по сравнению с препаратом в чистом виде, на 65,7% (5,8 см против 3,5 см) и обеспечило формирование плодов массой 228,2 г (+24,4% к контролю). При этом его применение в сочетании с дифеноконазолом приводит к снижению сухой массы корней, по сравнению с контролем, на 54,1%. *P. aureofaciens* BS 1393 более универсален и лучше взаимодействует с дифеноконазолом (+8,1% по высоте стебля к варианту с препаратом в чистом виде). Это подчеркивает необходимость штамм-специфичного подбора при разработке комплексных биопестицидных композиций.

Результаты проведенных исследований подтверждают перспективность разработки комплексных биопестицидных композиций для экологизации защиты растений при снижении химической нагрузки на агроэкосистемы в 2 раза, что соответствует требованиям устойчивого развития сельского хозяйства.

Сведение о финансировании. Работа выполнена в рамках Государственного задания № 124050300050-4.

Литература

1. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture / R. Backer, J. S. Rokem, G. Ilangumaran, et al // Frontiers in plant science. 2018. Vol. 9. P. 1473. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30405652 (дата обращения: 05.10.2025). doi: 10.3389/fpls.2018.01473.

2. Twenty years of postharvest biocontrol research: Is it time for a new paradigm? / S. Droby, M. Wisniewski, D. Macarisin, et al. // Postharvest biology and technology. 2019. Vol. 52. P. 137–145. doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.11.009.

3. De novo genome assembly and analysis unveil biosynthetic and metabolic potentials of Pseudomonas fragi A13BB / O. K. Awolope, N. H. O'Driscoll, A. Di Salvo, et al. // BMC Genomic Data. 2021. Vol. 22. P. 15. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34006216 (дата обращения: 10.10.2025). doi: 10.1186/s12863-021-00969-0.

4. Plant growth-promoting agents of pre- and postharvest diseases: fundamentals, methods of application and future perspectives / L. R. Morales-Cedeno, M. C. Orozco-Mosqueda, P. D. Loeza-Lara, et al. // Microbiological research. 2021. Vol. 242. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33059112 (дата обращения: 10.10.2025). doi: 10.1016/j.micres.2020.126612.

5. Догадина М. А., Правдюк А. И., Криворотова Е. И. Вызовы и тренды рынка биопестицидов // Вестник аграрной науки. 2024. № 2 (107). С. 40–48. doi: 10.17238/issn2587-666X.2024.2.40.

6. Ризосферные бактерии рода Pseudomonas в современных агробиотехнологиях / Т. О. Анохина, Т. В. Сиунова, О. И. Сизова и др. // Агрохимия. 2018. №. 10. С. 54–66. doi: 10.1134/S0002188118100034.

7. Рябчинская Т. А., Зимина Т. В. Средства, регулирующие рост и развитие растений, в агротехнологиях современного растениеводства // Агрохимия. 2017. № 12. С. 62–92.

8. Сидорова Т. М., Аллахвердян В. В., Асатурова А. М. Роль бактерий рода Pseudomonas и их метаболитов в биоконтроле фитопатогенных микроорганизмов // Агрохимия. 2023. № 5. С. 83–93. doi: 10.31857/S0002188123050071.

9. Роль бактерий рода Pseudomonas в устойчивом развитии агроэкосистем и защите окружающей среды (обзор) / Т. Ю. Коршунова, М. Д. Бакаева, Е. В. Кузина и др. // Прикладная биохимия и микробиология. 2021. Т. 57. № 3. С. 211–227. doi: 10.31857/S0555109921030089.

10. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture / S. Gouda, R. G. Kerry, G. Das, et al. // Microbiological Research. 2018. Vol. 206. P. 131–140. doi: 10.1016/j/micres.2017.08.016.

11. Микробные белки – элиситоры устойчивости растений к фитопатогенам и их потенциал для экологически ориентированной защиты сельскохозяйственных культур / Л. А. Щербакова, В. Г. Джавахия, Y. Duan и др. // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58. № 5. С. 789–820. doi: 10.15389/agrobiology.2023.5.789rus.

12. Попов И. Б., Белый А. И., Замотайлов А. С. Применение микроорганизмов в защите растений. Краснодар: Кубанский ГАУ. 2019. 125 с.

13. Fang Y., Ramasamy R. P. Current and prospective methods for plant disease detection // Biosensors. 2015. Vol. 5. No. 3. P. 537–561. doi: 10.3390/bios5030537.

14. Glick B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and ppplications // Scientifica. 2012. Article ID 963401. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24278762 (дата обращения: 14.10.2025). doi: 10.6064/2012/963401.

15. Эффективность комплексного использования биологических и химических средств защиты растений томата от фузариозной инфекции / Л. З. Каримова, Ш. З. Валидов, Г. Ф. Рахманова и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2025. Т. 79. № 3. С. 31–38.

Сведения об авторах:

Каримова Лилия Зяудатовна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: Karimova-lcd@mail.ru

Валидов Шамиль Завдатович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: sh.validov@knc.ru

Рахманова Гульнара Фанисовна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: gulnara_rakhmanova@mail.ru

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.

Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, первый проректор, чл.-корр. АН РТ, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

GROWTH-PROMOTING EFFECT OF MICROORGANISMS AND CHEMICAL FUNGICIDES USED IN COMBINATION ON TOMATOES

L. Z. Karimova, Sh. Z. Validov, G. F., Rakhmanova, A. R. Valiev

Abstract. The research was conducted to evaluate the growth-promoting activity of microorganism strains and their combinations with active ingredients of synthetic preparations on tomato plants for the development of integrated biopesticide formulations that ensure effective plant protection while reducing chemical load on agroecosystems. The work was carried out in 2025 under laboratory and vegetative conditions, with biometric indicators recorded on days 30, 60 and 90. Microbial strains *Pseudomonas aureofaciens* BS 1393, *Pseudomonas fluorescens* WCS 365, *Pseudomonas putida* PCL 1760 and *Trichoderma asperellum* T302, as well as the chemical fungicides mandipropamid and difenoconazole, and their combinations with microorganisms, were used on Khurma tomato cultivar. Pesticide concentrations were used at reduced doses (two times lower than manufacturer's recommendations). A statistically significant positive effect of all biological agents on tomato growth and productivity was established. The pure *T. asperellum* T302 strain demonstrated the greatest effect in the experiment, increasing stem height by 145.8% and average fruit mass by 22.5% relative to the control. A synergistic effect was revealed with combined application of the studied agents: the combination of mandipropamid with *P. putida* PCL 1760 increased root length by 65.7% (5.8 cm versus 3.5 cm) compared to the pure preparation and provided maximum fruit mass (228.2 g, +24.4% compared to the control), while the combination of difenoconazole with

P. aureofaciens BS 1393 ensured stable fruiting (3 fruits per cluster). The ability of bioagents to reduce the phytotoxicity of chemicals was confirmed, as well as the possibility of their use in this combination at half doses without loss of effectiveness. The experimental results demonstrate the potential for developing complex biopesticide compositions for greening plant protection.

Key words: tomato *(Solanum lycopersicum),* plant growth promoting rhizobacteria (PGPR), *Pseudomonas aureofaciens, Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas putida, Trichoderma asperellum,* biological control, mandipropamid, difenoconazole, synergistic effect, greening of agriculture.

References

1. Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. [Internet]. Frontiers in plant science. 2018; Vol.9. 1473 p. [cited 2025, October 05]. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30405652. doi: 10.3389/fpls.2018.01473.

2. Droby S, Wisniewski M, Macarisin D. Twenty years of postharvest biocontrol research: Is it time for a new paradigm? Postharvest biology and technology. 2019; Vol.52. 137-145 p. doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.11.009.

3. Awolope OK, O'Driscoll NH, Di Salvo A. De novo genome assembly and analysis unveil biosynthetic and metabolic potentials of *Pseudomonas fragi* A13BB. [Internet]. BMC Genomic Data. 2021; Vol.22. 15 p. [cited 2025, October 10]. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34006216. doi: 10.1186/s12863-021-00969-0.

4. Morales-Cedeno LR, Orozco-Mosqueda MC, Loeza-Lara PD. Plant growth-promoting agents of pre- and postharvest diseases: fundamentals, methods of application and future perspectives. [Internet]. Microbiological research. 2021; Vol.242. [cited 2025, October 05]. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33059112. doi: 10.1016/j.micres.2020.126612.

5. Dogadina MA, Pravdyuk AI, Krivorotova EI. [Challenges and trends of biopesticides market]. Vestnik agrarnoy nauki. 2024; 2 (107). 40-48 p. doi: 10.17238/issn2587-666X.2024.2.40.

6. Anokhina TO, Siunova TV, Sizova OI. [Rhizosphere bacteria of *Pseudomonas* genus in modern agrobiotechnologies]. Agrokhimiya. 2018; 10. 54-66 p. doi: 10.1134/S0002188118100034.

7. Ryabchinskaya TA, Zimina TV. [Agents regulating plant growth and development in modern crop production]. Agrokhimiya. 2017; 12. 62-92 p.

8. Sidorova TM, Allakhverdyan VV, Asaturova AM. [The role of *Pseudomonas* bacteria and their metabolites in the biocontrol of phytopathogenic microorganisms]. Agrokhimiya. 2023; 5. 83-93 p. doi: 10.31857/S0002188123050071.

9. Korshunova TYu, Bakaeva MD, Kuzina EV. [The role of *Pseudomonas Bacteria* in sustainable development of agroecosystems and environmental protection (review)]. Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2021; Vol.57. 3. 211-227 p. doi: 10.31857/S0555109921030089.

10. Gouda S, Kerry RG, Das G. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. Microbiological Research. 2018; Vol.206. 131-140 p. doi: 10.1016/j/micres.2017.08.016.

11. Shcherbakova LA, Dzhavakhiya VG, Duan Y. [Microbial proteins as elicitors of plant resistance to phytopathogens and their potential for environmentally oriented protection of agricultural crops]. Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2023; Vol.58. 5. 789-820 p. doi: 10.15389/agrobiology.2023.5.789rus.

12. Popov IB, Belyy AI, Zamotaylov AS. Primenenie mikroorganizmov v zashchite rasteniy. [Use of microorganisms in plant protection]. Krasnodar: Kubanskiy GAU. 2019; 125 p.

13. Fang Y, Ramasamy RP. Current and prospective methods for plant disease detection. Biosensors. 2015; Vol.5. No.3. 537-561 p. doi: 10.3390/bios5030537.

14. Glick BR. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. [Internet]. Scientifica. 2012; Article ID 963401. [cited 2025, October 14]. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24278762. doi: 10.6064/2012/963401.

15. Karimova LZ, Validov ShZ, Rakhmanova GF. [Effectiveness of complex use of biological and chemical plant protection products for tomato against Fusarium infection]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2025; Vol.79. 3. 31-38 p.

Authors:

Karimova Liliya Zyaudatovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Molecular Genetic and Microbiological Methods Laboratory, e-mail: karimova-lcd@mail.ru

Validov Shamil Zavdatovich – Ph.D. of Biological Sciences, Head of Molecular Genetic and Microbiological Methods Laboratory, e-mail: sh.validov@knc.ru

Rakhmanova Gulnara Fanisovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Molecular Genetic and Microbiological Methods Laboratory, e-mail: gulnara_rakhmanova@mail.ru

Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Kazan, Russia.

Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Engineering Sciences, First Vice-Rector, corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-47-51
УДК 631.51

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НУЛЕВОЙ И ТРАДИЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ НА НАКОПЛЕНИЕ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ

Е. В. Кузина

Реферат. Исследования проводили с целью сравнительной оценки влияния нулевой и традиционной обработки почвы на накопление продуктивной влаги в лесостепной зоне Среднего Поволжья. Работу выполняли в 2017–2023 годы в Ульяновской области. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: традиционная технология (вспашка на глубину 20 см под озимую и яровую пшеницу, ячмень, на 25 см под горох); нулевая (ежегодно без обработки). Почва опытного участка – чернозем типичный тяжелосуглинистый среднегумусный среднемощный с мощностью гумусового горизонта 79 см, содержанием гумуса – 6,4%, подвижных фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно 265…285 и 85…90 мг/кг, $pH_{сол}$ – 6,5…6,8 ед. Весной системы обработки почвы не влияли на водный режим корнеобитаемого и метрового слоев почвы под культурами севооборота, различия в запасах продуктивной влаги между вариантами в слоях 0…30 и 0…100 см составляли 0,5 и 0,1 мм соответственно. Сохранение пожнивных остатков при нулевой обработке способствовало большему сохранению влаги до уборки урожая, по сравнению со вспашкой, как в пахотном, так и в метровом слоях, на 7,5% и 8,4% соответственно. Внесение минеральных удобрений значительно снижало потребление воды растениями при обеих исследуемых системах обработки почвы. В варианте со вспашкой при использовании минеральных удобрений расход влаги уменьшился на 11,6%, в то время как в варианте с нулевой обработкой это снижение составило 20,9%, против неудобренного фона. Более значительное сокращение расхода влаги в варианте с нулевой обработкой объясняется большей отзывчивостью культур на внесенные удобрения. Так, на удобренном фоне, в сравнении с неудобренным, по вспашке прирост урожайности зерна составил 0,29 т/га, по нулевой обработке – 0,40 т/га.

Ключевые слова: запасы продуктивной влаги, обработка почвы, коэффициент водопотребления, озимая пшеница (*Triticum aestivum*), яровая пшеница (*Triticum aestivum*), ячмень (*Hordeum vulgare*), горох (*Pisum sativum*), удобрения, урожайность.

Введение. Климат Среднего Поволжья отличается недостаточным и крайне неравномерным распределением осадков. Несмотря на это, местные почвы обладают высоким уровнем плодородия и при адекватном увлажнении могут приносить обильные урожаи сельскохозяйственных культур. В засушливых районах этого региона главной целью обработки почвы становится максимальное накопление, сохранение и рациональное использование почвенной влаги [1].

Существующая ныне интенсивная система обработки почвы с использованием отвальных плугов не всегда способствует эффективному сохранению влаги. При глубокой вспашке в засушливых условиях образуются глыбы, которые за несколько месяцев утрачивают почти всю влагу от осенних осадков из-за испарения, вызванного выветриванием с пахотного слоя [2]. Ежегодная вспашка ускоряет потерю структуры почвы и способствует возникновению ветровой эрозии. Поэтому одной из важнейших задач земледелия Среднего Поволжья выступает совершенствование и внедрение научно обоснованной системы защиты почв от водной и ветровой эрозии, что в совокупности с другими мерами помогает эффективно справляться с засухами [3].

Решение этой задачи требует особого внимания к обработке почвы. Изучение и анализ различных приемов и глубины обработки почвы в засушливых зонах позволит выбрать систему обработки почвы, обеспечивающую более рациональное использование влаги, и будет максимально эффективной в конкретных условиях. При этом отказ от неэкономичной и малопроизводительной вспашки в пользу технологий минимизации или нулевой обработки почвы значительно сократит затраты, снизит расход горюче-смазочных материалов, повысит производительность труда [4], так как затраты на обработку почвы составляют значительную часть расходов в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур [5].

Вопрос сохранения и накопления влаги в почве был поднят более ста лет назад, и для его решения были предложены различные способы. Несмотря на это, проблема потери влаги сохраняет свою актуальность и продолжает быть в центре внимания ученых. По данным различных исследователей [6, 7], в засушливые годы, когда осадков выпадает мало за осенне-зимние периоды, мелкие и нулевые обработки не уступают глубоким по способности накопления влаги в метровом слое почвы, а в более влажные годы они уменьшают запасы на 25…27 мм.

Некоторые ученые [8, 9, 10] отмечают положительное влияние глубокой отвальной обработки на накопление атмосферной влаги за осенне-зимний период. Они связывают это с интенсивным рыхлением пахотного слоя, что способствует значительному увеличению его водопроницаемости. В то же время, другие авторы [11, 12, 13] считают, что поверхностные, плоскорезные и нулевые обработки имеют равную эффективность в насыщении метрового слоя почвы продуктивной влагой.

Разногласия между авторами подчеркивают противоречивость различных подходов к использованию водных ресурсов. При этом

обработка почвы остается ключевым элементом в комплексе мероприятий по накоплению влаги в засушливых регионах. Этот факт объясняется тем, что правильно проведенная обработка не только создает условия для лучшего проникновения и удержания влаги в почве, но и способствует снижению испарения, тем самым сохраняя запасы влаги для нужд растений. Грамотный выбор и качественное проведение, обработки почвы позволяют не только повысить урожайность сельскохозяйственных культур, но и обеспечить устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях меняющегося климата. Адаптация способов обработки почвы к конкретным условиям служит залогом успешного земледелия и рационального использования водных ресурсов. Различия во взглядах указывают на отсутствие универсального способа, который бы подходил для всех типов почв и климатических условий, что подчеркивает актуальность проблемы и необходимость ее дальнейшего изучения.

Цель исследований – изучение воздействия систем обработки почвы на содержание продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы для совершенствования агротехнологий.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли с 2017 по 2023 годы в лесостепи Среднего Поволжья (Ульяновская область). Объектом служил – чернозем типичный. Предметом исследований выступали два различных подхода к обработке почвы.

Схема полевого опыта предусматривала изучение следующих вариантов:

- система обработки почвы (фактор А) – традиционная (отвальная вспашка на глубину 20 см под озимую и яровую пшеницу, ячмень, и на 25 см под горох); нулевая (ежегодно без обработки);

- минеральные удобрения (фактор В) – без удобрений (0); припосевное внесение $N_{30}P_{20}K_{15}$.

Делянки в опыте размещали систематически методом наложения. Повторность 4-кратная. Длина делянки – 40 м, ширина – 10 м. Общая площадь делянки 400 м^2, учетная – 240 м^2.

Изучение проводили в зернопаровом севообороте с чередованием культур: пар чистый – пшеница озимая – пшеница яровая – горох – пшеница озимая – ячмень яровой.

Подготовка почвы к посеву и уход за посевами при отвальной обработке включали предпосевную культивацию на глубину высева семян (культиватор КПС-4,0) и прикатывание после посева (каток ЗККШ-6А). Посев производили сеялкой СЗ-5,4. При нулевой обработке предпосевная обработка, посев и прикатывание выполняли за один проход сеялкой АУП-18,07.

Посев озимой пшеницы осуществляли преимущественно в первой декаде сентября с нормой высева 5,5- млн. всхожих семян/га, Яровые культуры высевали, как правило, в первой декаде мая, когда почва достигала физической спелости, с нормой высева 5,0 млн всхожих семян на 1 га для яровой пшеницы, 4,5 млн для ячменя и 1,3 млн всхожих семян на 1 га для гороха на глубину 5…6 см.

Все учеты, наблюдения и исследования в опыте проводили по общепринятым методикам.

Влажность почвы определяли в весенний период, когда озимая пшеница начинала вегетацию, до посева яровых культур и непосредственно перед сбором урожая термостатно-весовым методом с последующим пересчётом содержания влаги (%) в мм продуктивной влаги в слое 0…30 и 0…100 см. Пробы отбирали на двух несмежных повторениях по две скважины послойно через 10 см до глубины 1 м. Взятые образцы помещали в бюксы, взвешивали, затем высушивали при температуре 105°С в течение 6 часов.

Вегетационные периоды во все годы исследований, за исключением 2017 году, характеризовались превышением температуры относительно среднемноголетних значений. В 2018 году превышение составило 2,0°С (при среднемноголетней норме 17,1°С), в 2019 году – 1,4°С, в 2020 году – 0,9°С, в 2021 году – 4,4°С, в 2022 году – 0,9°С и в 2023 году – 1,7°С. В 2017 году температура воздуха была на 0,2°С ниже обычной.

Количество осадков по годам в вегетационные периоды отличалось значительной изменчивостью, что типично для лесостепной зоны Среднего Поволжья: от минимальных 104,9 мм в 2023 году до максимальных 319,4 мм в 2017 году. Анализ типизации лет на основе гидротермического коэффициента (ГТК) за период активного развития растений (май-август) показал, что 2018, 2021 и 2023 годы отличались жаркими и засушливыми условиями, с дефицитом осадков 52, 37 и 53% от климатической нормы (226 мм) соответственно. Величина ГТК в эти годы составила 0,5, 0,5 и 0,6, при норме 1,0. В 2019 году уровень увлажнения соответствовал среднемноголетним значениям и составил 220,3 мм при норме 226 мм, а значение ГТК – 1,0 (при норме 1,0). Вегетационные периоды 2017, 2020 и 2022 годы отличались влажной погодой, с превышением количества осадков на 41, 27 и 12% относительно нормы (226 мм).

Отмечено чередование периодов с повышенной температурой и дефицитом осадков с периодами, характеризующимися более умеренными температурами и достаточным или даже избыточным увлажнением. Это создает определенные вызовы для сельскохозяйственного производства, требуя адаптации агротехнологий к изменяющимся климатическим условиям.

Результаты и обсуждение. Анализ данных, собранных за ротацию севооборота, показал, что в наших опытах, проведенных на равнинных участках с хорошей естественной водопроницаемостью почвы, способы обработки не оказывали значительного

влияния на изменение водного баланса в корнеобитаемом и метровом слоях почвы (табл. 1). Весной, под посевами озимой пшеницы, которая была посеяна по чистому пару, и ячменя в слое почвы 0…30 см на фоне вспашки, уровень продуктивной влаги составил 27,1 и 32,3 мм. В почве, где использовали нулевую обработку, величина этого показателя составляла 26,0 и 30,9 мм, что на 4,1 и 4,4% ниже. Для посевов озимой пшеницы, посеянной после гороха по занятому пару, а также под яровой пшеницей, наоборот, продуктивной влаги в пахотном слое оказалась больше в варианте с нулевой обработкой – 39,6 и 38,4 мм соответственно, что превышало показатели на вспаханной почве на 6,2 и 8,4%, где они достигали 37,3 и 35,4 мм. Под горохом исследуемые параметры находились практически на одном уровне – 36,5 и 36,2 мм, с различиями менее 1%.

Таблица 1 – Запасы продуктивной влаги под посевами сельскохозяйственных культур в зависимости от применяемых систем обработки почвы (среднее за 2017–2023 годы), мм

Культура севооборота	Весна (всходы)				Осень (полная спелость)			
	традиционная	нулевая	традиционная	нулевая	традиционная	нулевая	традиционная	нулевая
	0…30 см		0…100 см		0…30 см		0…100 см	
Озимая пшеница	27,1	26,0	93,1	92,9	40,1	40,4	78,7	82,5
Яровая пшеница	35,4	38,4	117,6	131,4	23,8	27,0	51,6	53,4
Горох	36,5	36,2	127,6	116,4	16,5	18,5	40,2	47,3
Озимая пшеница	37,3	39,6	127,4	123,6	12,5	13,1	36,7	44,7
Ячмень	32,3	30,9	111,1	112,3	14,3	15,9	60,1	62,1
Среднее	33,7	34,2	115,4	115,3	21,4	23,0	53,5	58,0
$НСР_{05}$	0,4		0,3		0,4		1,0	

За ротацию севооборота нулевая обработка почвы оказалась равноценной вспашке по наполнению весной пахотного и метрового слоя продуктивной влагой (табл. 1). В среднем по севообороту для участка с традиционной вспашкой запасы влаги в пахотном слое составили 33,7 мм, а для участка с нулевой обработкой – 34,2 мм, или разница составила лишь 0,5 мм. При весеннем измерении влаги в метровом слое также достоверных различий между изучаемыми системами обработки почвы не выявлено, они не превышали 0,1 мм при НСР (0,3).

Различия в запасах влаги между двумя системами обработки почвы становились более заметными к уборке урожая. Традиционная отвальная обработка, особенно на начальных фазах роста растений, вызывала более быстрое испарение влаги. Вспашка разрушала капиллярную структуру, что увеличивало ее воздушную проницаемость и, как следствие, водопотери. В отличие от этого, нулевая обработка сохраняла естественное строение почвы, снижала уровень испарения и способствовала накоплению влаги от осадков и конденсации. Это особенно важно в засушливых районах, где нехватка влаги выступает одним из ключевых факторов, ограничивающих урожайность сельскохозяйственных культур.

К уборке, в связи с расходом влаги на испарение и формирование урожая, запасы продуктивной влаги в метровом слое уменьшились в обоих вариантах под всеми культурами. При прямом посеве уровень влаги в метровом слое почвы снизился от 115,3 мм до 58,0 мм, а при вспашке – от 115,4 мм до 53,5 мм. Уменьшение запасов влаги в первом случае составило 57,3 мм, а во втором – 61,9 мм. То есть расход влаги при нулевой обработке оказался более экономичным. В среднем по севообороту в слоях 0…30 см и 0…100 см влажность почвы при использовании прямого посева оказалась выше по сравнению со вспашкой на 7,5% и 8,4% соответственно, с разницей в 1,6 и 4,5 мм при НСР (0,4 и 1,0 мм).

Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования нулевой обработки почвы в засушливых условиях. Несмотря на то, что весной запасы влаги в почве после нулевой обработки под некоторыми культурами были несколько ниже, в дальнейшем, в течение вегетационного периода, эта система обработки обеспечивала более эффективное сохранение и использование влаги растениями. Вышеуказанное выражалось в большем количестве влаги в пахотном и метровом слоях почвы. Это объясняется тем, что в варианте с нулевой обработкой ненарушенная корневая система предшествующих культур служила своеобразным каналом для проникновения влаги вглубь, а растительные остатки на поверхности почвы уменьшали испарение и защищали почву от эрозии, что крайне значимо в регионах, подверженных засухам и ветровой эрозии.

Одним из действенных способов увеличения урожайности зерновых культур выступает использование минеральных удобрений. Хотя это мероприятие требует значительных затрат, важно повысить его эффективность посредством внедрения инновационных методов обработки почвы, которые помогают улучшить увлажненность и плодородие земель.

Таблица 2 – Влияние удобрений и обработки почвы на коэффициент водопотребления и урожайность культур севооборота

Культура севооборота	Урожайность, т/га						Расход влаги, мм/т			
	$N_0P_0K_0$		$N_{30}P_{20}K_{15}$		среднее		$N_0P_0K_0$		$N_{30}P_{20}K_{15}$	
	вспашка	нулевая	вспашка	нулевая	вспашка	нулевая	вспашка	нулевая	вспашка	нулевая
Озимая пшеница	3,28	3,34	3,46	3,64	3,37	3,49	94,6	91,7	89,7	84,2
Яровая пшеница	2,56	2,59	2,70	2,93	2,63	2,76	142,2	145,2	134,8	128,3
Горох	2,26	2,24	2,41	2,38	2,48	2,31	158,0	151,3	148,2	142,4
Озимая пшеница	2,61	2,39	3,20	2,99	2,90	2,69	111,3	116,6	90,8	93,2
Ячмень	1,71	1,34	2,08	1,95	1,89	1,64	171,9	218,8	141,3	150,3
Среднее	2,48	2,38	2,77	2,78	2,65	2,58	135,6	144,7	121,5	119,7
$НСР_{05}$	A – 0,09; B – 0,04; AB – 0,12				A – 0,20		A – 1,3; B – 0,6; AB – 1,9			

Аналогичная тенденция отмечена и в варианте с нулевой обработкой почвы, где при внесении удобрений коэффициент водопотребления сократился на 20,9% до 119,7 мм/т, против неудобренного фона, где он составлял 144,7 мм/т.

Удобрения оказывали положительное влияние на рациональное использование влаги, содержащейся в почве, это особенно актуально для условий богарного земледелия, где запасы влаги формируются исключительно вследствие выпадения осадков.

Выводы. В условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья весной, перед посевом яровых зерновых культур и началом вегетации озимой пшеницы в слое почвы 0…30 см, под озимой пшеницей по чистому пару и под ячменем запасы продуктивной влаги в варианте со вспашкой достигали 27,1 и 32,3 мм соответственно. При прямом посеве величины этих показателей были на 4,1 и 4,4% ниже. Для озимой пшеницы после гороха по занятому пару, а также для яровой пшеницы отмечена противоположная картина: содержание продуктивной влаги в слое 0…30 см при нулевой обработке составляло 39,6 и 38,4 мм, что выше, чем после вспашки, на 6,2 и 8,4%. Под посевами гороха оно находилось на одном уровне – 36,5 и 36,2 мм.

В среднем по севообороту традиционная вспашка (0…30 см) обеспечивала содержание влаги в почве на уровне 33,7 мм. При нулевой обработке величина этого показателя была ниже на 0,5 мм. Весеннее измерение влажности в метровом слое почвы также не выявило существенных различий между системами обработки, они не превышали 0,1 мм.

Нулевая обработка почвы позволила лучше сохранять влагу в почве. К фазе созревания сельскохозяйственных культур, влажность почвенного слоя глубиной до 1 м при нулевой обработке снизилась относительно весенних значений на 57,3 мм. В варианте с традиционной вспашкой запасы продуктивной влаги уменьшились на 61,9 мм.

При традиционной вспашке использование удобрений позволило сократить расход влаги на 11,6%, а при прямом посеве – на 20,9%, по сравнению с фоном без удобрений. Следовательно, применение удобрений особенно в технологиях, основанных на нулевой обработке почвы, в зоне не устойчивого увлажнения, где дефицит влаги лимитирует размеры урожая, служит важным инструментом для оптимизации водопотребления зерновых культур.

Литература

1. Кузина Е. В. Эффективность систем обработки почвы на различных фонах минеральных удобрений при возделывании горчицы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. Т. 67. № 5 (401). С.570–573. doi: 10.55186/25876740_2024_67_5_570.

2. Эффективность применения системы прямого посева на чернозёме южном Волгоградской области / В. К. Дридигер, Т. В. Волошенкова, Р. Г. Гаджиумаров и др. // Земледелие. 2025. № 4. С. 17–23. doi: 10.24412/0044-3913-2025-4-17-23.

3. Эффективность применения прямого посева и минимальной обработки почвы при возделывании кукурузы на зерно / В. Ф. Федоренко, Д. А. Петухов, С. А. Свиридова и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. № 2. С. 14–21. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-14-21.

4. Responses of soil organic carbon and crop yields to 33-year mineral fertilizer and straw additions under different tillage systems / H. Zhang, E. A. Hobbie, P. Feng, et al. // Soil and Tillage Research. 2021. Vol. 209. Article 104943 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198721000131 (дата обращения: 22.06.2025). doi: 10.1016/j. still.2021.104943.

5. Эффективность технологии No-till в засушливой зоне Ставропольского края / В. К. Дридигер, В. В. Кулинцев, С. А. Измалков и др. // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 1. С. 52–56. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10110.

6. Влияние способов обработки почвы на запасы почвенной влаги в учебно-опытном поле Оренбургского ГАУ / Ф. Г. Бакиров, Ю. М. Нестеренко, Д. Г. Поляков и др. // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2015. № 4. С. 1–6. URL: http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2015-/Articles/MYN-2015-4.pdf) (дата обращения: 21.06.2025).

7. Буренок В. П., Язева Л. А., Кукшенева Т. П. Плодородие и влагообеспеченность почвы при почвозащитных системах земледелия. // Земледелие. 2011. № 4. С. 39–40

8. Влияние применения различных способов основной обработки на запасы продуктивной влаги в агрочерноземах / А. М. Гребенников, А. С. Фрид, С. В. Сапрыкин и др. // Агрохимия. 2019. № 8. С. 40–47. doi: 10.1134/ S0002188119080052

9. Functional response of soil microbial communities to tillage cover crops and nitrogen fertilization / E. Nivelle, J. Verzeaux, H. Habbib, et al. // Applied Soil Ecology. 2018. Vol. 108. P. 147–155.

10. Влияние приемов основной обработки почвы на динамику запасов влаги и урожайность гороха посевного в условиях лесостепи европейской части России / О. В. Букин, Д. В. Бочкарев, А. Н. Никольский и др. // Аграрная наука. 2020. № 6 (339). С. 58–61. doi: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-58-61.

11. Кузина Е. В., Немцев С. Н. Влияние обработки почвы на её целлюлозоразлагающую активность и влагообеспеченность // Научная жизнь. 2023. Т. 1. № 3. С.400–408. doi: 10.35679/1991-9476-2023-18-3.

12. Эффективность применения технологии No-Till на черноземах обыкновенных Ставропольского края / В. С. Цховребов, А. Б. Тетенищев, В. И. Фаизова и др. // Земледелие. 2021. № 3. С. 15–19.

13. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains / G.156 Singh, R. Bhattacharyya, T. K. Das, et al. // Soil and Tillage Research. 2018. Vol.184. P. 291-300.

Сведения об авторе:

Кузина Елена Викторовна - кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая отделом земледелия и технологий возделывания сельскохозяйственных культур, e-mail:elena.kuzina@autorambler.ru

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.С. Немцева, Ульяновская обл., Ульяновский р-н, пос. Тимирязевский, Россия.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF NO-TILL AND TRADITIONAL TILLAGE IMPACT ON PRODUCTIVE MOISTURE ACCUMULATION

E. V. Kuzina

Abstract. The study was conducted to comparatively assess the impact of no-till and traditional tillage on productive moisture accumulation in the forest-steppe zone of Middle Volga region. The work was conducted from 2017 to 2023 in Ulyanovsk region. The experimental design involved studying the following options: traditional tillage (plowing to a depth of 20 cm for winter and spring wheat, barley and 25 cm for peas); no-till (annually no tillage). The soil of the experimental plot is a typical heavy loamy medium-humus chernozem of medium depth with a humus horizon thickness of 79 cm, a humus content of 6.4%, mobile phosphorus and potassium (according to Chirikov) of 265...285 and 85...90 mg/kg, respectively, and a pH of 6.5...6.8 units. In spring, the tillage systems did not affect the water regime of the root-inhabited and 1-meter soil layers under crop rotation crops; the differences in productive moisture reserves between the variants in the 0...30 and 0...100 cm layers were 0.5 and 0.1 mm, respectively. Preservation of crop residues during no-tillage contributed to greater moisture retention before harvesting, compared to plowing, in both the arable and 1-meter layers, by 7.5% and 8.4%, respectively. The application of mineral fertilizers significantly reduced plant water consumption under both tillage systems studied. In the tillage system, water consumption decreased by 11.6% with the use of mineral fertilizers, while in the no-till system, this decrease was 20.9%, compared to the unfertilized control. The more significant reduction in water consumption in the no-till system is explained by the crops' greater responsiveness to the applied fertilizers. Thus, under fertilized conditions, compared to the unfertilized control, the grain yield increase under tillage was 0.29 t/ha, while under no-till, it was 0.40 t/ha.

Key words: productive moisture reserves, tillage, water consumption coefficient, winter wheat (*Triticum aestivum*), spring wheat (*Triticum aestivum*), barley (*Hordeum vulgare*), pea (*Pisum sativum*), fertilizers, yield.

References

1. Kuzina EV. [Efficiency of tillage systems with different mineral fertilizer applications in mustard cultivation]. Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal. 2024; Vol.67. 5 (401). 570-573 p. doi: 10.55186/25876740_2024_67_5_570.

2. Dridiger VK, Voloshenkova TV, Gadzhiumarov RG. [Efficiency of direct seeding on southern chernozem in Volgograd region]. Zemledelie. 2025; 4. 17-23 p. doi: 10.24412/0044 3913 2025 4 17 23.

3. Fedorenko VF, Petukhov DA, Sviridova SA. [Efficiency of direct seeding and minimum tillage in grain corn cultivation]. Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. 2022; Vol.16. 2. 14-21 p. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-14-21.

4. Zhang H, Hobbie EA, Feng P. Responses of soil organic carbon and crop yields to 33-year mineral fertilizer and straw additions under different tillage systems. [Internet]. Soil and Tillage Research. 2021; Vol.209. Article 104943. [cited 2025, June 22]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198721000131. doi: 10.1016/j. still.2021.104943.

5. Dridiger VK, Kulintsev VV, Izmalkov SA. [Efficiency of no-till technology in the arid zone of Stavropol Krai]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2021; Vol.35. 1. 52-56 p. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10110.

6. Bakirov FG, Nesterenko YuM, Polyakov DG. [The influence of soil cultivation methods on soil moisture reserves in the experimental field of Orenburg State Agrarian University]. [Internet]. Byulleten Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN. 2015; 4. 1-6 p. [cited 2025, June 21]. Available from: http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2015-/Articles/MYN-2015-4.pdf).

7. Burenok VP, Yazeva LA, Kuksheneva TP. [Soil fertility and moisture supply under soil-conservation farming systems]. Zemledelie. 2011; 4. 39-40 p.

8. Grebennikov AM, Frid AS, Saprykin SV. [Effect of different primary tillage methods on productive moisture reserves in agro-chernozem soils]. Agrokhimiya. 2019; 8. 40-47 p. doi: 10.1134/ S0002188119080052

9. Nivelle E, Verzeaux J, Habbib H. Functional response of soil microbial communities to tillage cover crops and nitrogen fertilization. Applied Soil Ecology. 2018; Vol.108. 147-155 p.

10. Bukin OV, Bochkarev DV., Nikolskiy AN. [The impact of primary tillage practices on the dynamics of moisture reserves and the yield of peas in the forest-steppe conditions of the European Part of Russia]. Agrarnaya nauka. 2020; 6 (339). 58-61 p. doi: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-58-61.

11. Kuzina EV, Nemtsev SN. [The impact of soil tillage on its cellulose-decomposing activity and moisture supply]. Nauchnaya zhizn. 2023; Vol.1. 3. 400-408 p. doi: 10.35679/1991-9476-2023-18-3.

12. Tskhovrebov VS, Tetenishchev AB, Faizova VI. [Efficiency of no-till technology on ordinary chernozems of Stavropol Krai]. Zemledelie. 2021; 3. 15-19 p.

13. Singh G, Bhattacharyya R, Das TK. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. Soil and Tillage Research. 2018; Vol.184. 291-300 p.

Author:

Kuzina Elena Viktorovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, Head of Agriculture and Crop Cultivation Technologies Department, e-mail: elena.kuzina@autorambler.ru

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture named after N.S. Nemtsev, Ulyanovsk Region, Ulyanovsk District, Timiryazevsky Village, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-52-57
УДК 634.863

АГРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГРУППЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СОРТОВ ВИНОГРАДА В ЧЕРНОМОРСКОЙ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

А. А. Лукьянова, Д. Ю. Скосырская

Реферат. Исследований проводили с целью изучения особенностей агробиологических показателей группы технических сортов винограда местной селекции (Достойный, Каберне АЗОС, Красностоп АЗОС, Кубанец), созданных в результате скрещиваний высококачественных сортов винограда с селекционной формой Филлоксероустойчивый Джемете, в условиях Черноморской агроэкологической зоны Краснодарского края. Работу выполняли на базе Анапской ампелографической коллекции по общепринятым методикам. Продолжительность фенологического периода от начала распускания почек до начала цветения у всех сортов в 2024 году сокращалась, по отношению к 2022–2023 годам, и была минимальной в опыте у сортов Каберне АЗОС и Красностоп АЗОС (43 дня). По результатам 2022–2024 годов сорта Каберне АЗОС, Красностоп АЗОС и Достойный отнесены к группе со средним сроком созревания, Кубанец и Каберне Совиньон (контроль) – к группе поздних сортов. Больше всего распустившихся и плодоносных побегов было зафиксировано у сорта Достойный – 89…94% и 87…92% соответственно. Коэффициенты плодоношения и плодоносности у всех исследуемых сортов, за исключением Каберне АЗОС, превышали значение 1,0. Наибольшая в опыте урожайность отмечена у сортов Кубанец и Достойный – 13,0 кг/куст и 12,6 кг/куст соответственно. Оптимальными кондициями по глюкоацедометрическому показателю для приготовления сухих вин в 2022-2023 годы отличались сорта Достойный (3,2…3,9) и Каберне АЗОС (3,5…3,7), в 2024 году – контрольный сорт. Кондиции сусла сорта Кубанец (3,7) соответствовали оптимальным для приготовления сухих вин только в 2022 году, в остальные годы они, как и кондиции сорта Красностоп АЗОС в течение всего периода исследований, соответствовали параметрам пригодности для десертных вин.

Ключевые слова: виноград (*Vitis L.*), технические сорта, фенология, агробиология, урожайность, кондиции урожая.

Введение. Виноградарство – отрасль сельского хозяйства Российской Федерации, обеспечивающая население свежим виноградом, а винодельческую, консервную и кондитерскую промышленности – сырьем. Государственная поддержка отрасли осуществляется в виде субсидий на приобретение посадочного материала отечественного производства, закладку и уход за молодыми виноградниками и др., что позволяет возмещать часть затрат для сельхозтоваропроизводителей и способствовать развитию данной отрасли. Такие меры поддержки способствуют увеличению площадей виноградных насаждений, закладываемых посадочным материалом, произведенным непосредственно в нашей стране, и производству отечественной виноградно-винодельческой продукции [1, 2, 3]. Лидирующие позиции в отрасли занимает Краснодарский край – площадь насаждений винограда в сельскохозяйственных организациях региона в 2023 году насчитывала 27,6 тыс. га, это 34% от всех площадей виноградников страны. По объемам производства вина и шампанского доля Краснодарского края составляет 46% и 51% соответственно *(https://admkrai.krasnodar.ru/content/1239/show/769902/)*.

Основу сортимента насаждений винограда Краснодарского края составляют классические сорта технического направления использования. Однако их возделывание сильно затрудняет деятельность сосущего вредителя филлоксеры *Daktulosphaira vitifoliae* [4, 5, 6]. У этой проблемы есть два решения: более затратное – привитая культура и менее затратное – возделывание толерантных сортов. Выведение сортов для корнесобственной культуры, сохраняющих качество классических сортов, весьма актуально. В последние годы российские потребители проявляют повышенный интерес к винам, произведенным из сортов местной селекции, которые обладают индивидуальными особенностями, а возделывание сортов винограда в агроэкологических условиях региона их происхождения позволяет более полно раскрыть потенциал таких генотипов, так как они наиболее приспособлены к почвенным и климатическим условиям [7, 8]. Вина, произведенные из таких отечественных сортов, как Достойный и Красностоп анапский, на международных конкурсах получают признание и завоевывают первые места [9]. Развитие виноградовинодельческой отрасли края непосредственно связано с выведением отечественных сортов, которые будут способствовать интенсификации производства.

Цель исследования – в условиях Черноморской агроэкологической зоны Краснодарского края изучить особенности агробиологических показателей группы технических сортов винограда местной селекции, полученных в результате скрещиваний высококачественных сортов винограда с селекционной формой Филлоксероустойчивый Джемете.

Условия, объекты и методы. Объектом исследований служили технические сорта винограда Достойный, Каберне АЗОС, Красностоп АЗОС и Кубанец (см. рис.), которые произрастают в корнесобственной культуре со схемой посадки кустов 3 м × 1,5 м. Контрольный сорт Каберне Совиньон возделывали с аналогичной схемой посадки в привитой

культуре, так как он подвержен повреждению корневой формой филлоксеры, а Черноморская агроэкологическая зона виноградарства относится к зоне сплошного заражения этим вредителем. Технология возделывания общепринятая для южной зоны промышленного виноградарства РФ.

Работу выполняли с 2022 по 2024 годы на базе центра коллективного пользования Анапская ампелографическая коллекция (ЦКП ААК) по общепринятым методикам: фенологические учеты – путем обследования кустов в вегетационный период в фазы распускания почек, роста побегов, цветения, роста ягод, созревания ягод [10], агробиологические учеты – по методике М. А. Лазаревского [11]. Почва опытного участка ЦКП ААК – чернозем южный карбонатный малогумусный мощный тяжелосуглинистого гранулометрического состава, сформированный на лессовидных суглинках и глинах, с содержанием гумуса 2,1…2,7% (по Тюрину), реакция среды слабощелочная ($pH_{вод.}$ 7,1…7,3), содержание общих карбонатов составляло 9…12%, активных карбонатов – 5…10% (по методу Друйно-Гале), подвижного фосфора – 2,9…3,1 мг/100 г (ГОСТ 26205-91), обменного калия – 28-30 мг/100 г (ГОСТ 26210-91). Массовую концентрацию сахаров и титруемых кислот в составе сока ягод исследуемых сортов винограда определяли по ГОСТ 27198-87, ГОСТ 32114-2013.



Каберне АЗОС



Красностоп АЗОС



Достойный



Кубанец



Каберне Совиньон

Рис. - Грозди исследуемых сортов винограда (фото АЗОСВиВ – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ)

При подборе сортов винограда для закладки насаждений в конкретной местности (терруаре) необходимо владеть информацией по фенологическим показателям планируемого к возделыванию сорта, так как наступление и прохождение фаз винограда непосредственно связано с агроклиматическими показателями и важно для разработки агротехники сорта. Вегетационный период у культуры винограда наступает, когда среднесуточные температуры переходят через 10°С. Внешним проявлением начала вегетации у винограда принято считать фазу начала распускания почек, так как сокодвижение у этой культуры не выступает постоянным биологическим состоянием, которое предшествует распусканию.

Лимитирующими факторами произрастания винограда в агроклиматических условиях Краснодарского края могут быть температурные «качели» зимнего периода и весенние заморозки, а также характер распределения осадков в период вегетации. Так, в условиях Черноморской агроэкологической зоны годовая норма осадков за период 1991–2020 годы, по данным Гидрометцентра России, составляет 566 мм, а наиболее засушливые месяцы за этот период – июль, август и сентябрь. В отдельные годы суммы осадков могут иметь существенные отклонения от нормы. Так, в период исследований наименьшим количеством осадков характеризовался 2022 году, когда выпало 520 мм (табл. 1). Недобор осадков отмечен в мае, когда у виноградного растения происходит интенсивный рост побегов, и в июле, августе. В вегетационный период 2023 году осадки превысили норму, однако в период созревания винограда (август-сентябрь) выявлен недобор осадков. В 2024 году начало вегетации винограда (апрель) совпало с недобором осадков, который сохранялся до июня. Летний период 2024 года также характеризовался преимущественно сухой погодой – осадки носили ливневый характер и по территории распределялись неравномерно. Отмечали суховейные явления.

Таблица 1 – Основные метеорологические показатели Черноморской агроэкологической зоны

Месяц	Сумма осадков, мм						Средняя температура воздуха,					
	2022 г		2023 г		2024 г		2022 г		2023 г		2024 г	
	мм	% от нормы	мм	% от нормы	мм	% от нормы	°С	+- к норме	°С	+- к норме	°С	+-к норме
1	127	212	29	48	124	207	4,0	1,1	5,8	2,9	4,6	1,7
2	65	138	35	74	23	48	6,7	3,5	3,3	0,1	7,8	4,6
3	38	75	36	71	26	51	3,5	-2,9	8,3	1,9	8,9	2,5
4	54	142	57	150	8	21	11,6	0,6	12,1	1,1	15,7	4,7
5	14	35	36	90	23	58	14,8	-1,4	16,1	-0,1	16,7	0,5
6	41	100	46	112	37	90	23,0	1,7	22,1	0,8	23,8	2,5
7	9	26	29	86	15	44	24,2	-0,2	24,7	0,3	28,4	4,0
8	9	26	0	0	104	306	27,0	2,5	27,1	2,6	25,8	1,3
9	66	122	4,3	8	28	51	20,5	1,0	21,8	2,3	23,1	3,6
10	33	62	33	62	64	121	15,4	1,4	16,1	2,1	15,2	1,2
11	29	58	223	446	52	104	10,8	2,5	12,9	4,6	8,6	0,3
12	35	56	73	116	53	84	7,9	3,1	8,9	4,1	6,4	1,6
за год	520		601,3		557		14,1		14,9		15,4	

Результаты и обсуждение. В условиях Черноморской агроэкологической зоны сокодвижение у винограда отмечают неоднократно – в период зимних оттепелей и весной. Причем, весной, оно проявляется более дружно, а в зимний период на единичных кустах. Начало распускания почек всегда носит массовый характер. Так, в годы исследований у изучаемых сортов распускание почек происходило в апреле. Особенно ранним распусканием почек – в первой декаде апреля (с 5 по 8) характеризовался 2024 году (табл. 2). Очень раннее начало вегетации не всегда можно расценивать, как положительное явление, так как слабое нарастание температуры в ранневесенний период приводит к медленному развитию побегов. В апреле 2024 году температура воздуха составила 15,7°С, что выше нормы на 4,7°С, недружного развития побегов изучаемых сортов не отмечено. У сорта Красностоп АЗОС фаза распускания почек наступает в более ранние сроки. Условия 2024 года оказались нетипичными: средняя температура воздуха на протяжении всего года превышала норму либо была равна ей, что не могло не отразиться на развитии винограда. Выявлено сокращение периода от начала распускания почек до начала цветения у всех изучаемых сортов в 2024 году по отношению к 2022–2023 годам. Наименьшая в эксперименте продолжительность этого фенологического этапа была зафиксирована у сортов Каберне АЗОС и Красностоп АЗОС, составившая 43 дня. Примечательно, что в 2024 году отмечено самое раннее цветение за весь период наблюдения, которое происходило в третьей декаде мая, что опережает среднемноголетние сроки. Этот феномен может быть обусловлен совокупностью агроклиматических факторов, включая аномалии температурного режима.

Таблица 2 – Фенологические особенности технических сортов винограда

Сорт	Год	Дата начала фенофазы			Полная зрелость ягод	Число дней от распускания до		Сумма температур, °С
		распускание глазков	цветение	созревание ягод		начала цветения	полной зрелости ягод	
Достойный	2022	23.04	08.06	03.08	14.09	46	144	3143,3
	2023	15.04	06.06	30.07	13.09	52	151	3259,6
	2024	08.04	22.05	21.07	25.08	44	139	3140,8
	среднее					47	144	3181,2
Каберне АЗОС	2022	21.04	08.06	30.7	07.09	48	139	3021,6
	2023	16.04	06.06	28.07	15.09	51	152	3289,9
	2024	08.04	21.05	23.07	20.08	43	134	3006,2
	среднее					47	141	3105,9
Красностоп АЗОС	2022	18.04	07.06	28.07	07.09	50	142	3055,3
	2023	15.04	05.06	26.07	30.08	51	137	2976,8
	2024	05.04	18.05	15.07	18.08	43	135	2993,1
	среднее					48	138	3008,4
Кубанец	2022	23.04	09.06	02.08	15.09	47	145	3165,1
	2023	17.04	07.06	25.07	26.09	51	162	3514,1
	2024	07.04	24.05	18.07	25.08	47	140	3155,5
	среднее					48	147	3278,2
Каберне-Совиньон (к)	2022	23.04	09.06	07.08	26.09	47	156	3380,3
	2023	18.04	08.06	05.08	02.10	51	167	3634,7
	2024	08.04	22.05	25.07	17.09	44	162	3680,6
	среднее					47	162	3565,2

Анализ фенологических данных за период 2022–2024 годы показал, что сорта Каберне АЗОС, Красностоп АЗОС и Достойный относятся к группе со средним сроком созревания. Для достижения полной зрелости ягод этих сортов потребовалась сумма температур от 3008,4 до 3181,2°С. Сорта Кубанец и Каберне Совиньон (контрольный сорт) демонстрируют более длительный период вегетации и относятся к группе поздних сортов. Для созревания этих сортов потребовалась сумма активных температур в интервале 3278,2–3565,2°С.

Во все годы исследования изучаемые сорта показали высокую распускаемость почек. Повреждений глазков морозами в осенне-зимние периоды исследований не отмечено. Больше всего распустившихся и плодоносных побегов зафиксировано у сорта Достойный, 89…94% и 87…92% соответственно (табл. 3). Меньше всего плодоносных побегов отмечено у сорта Каберне АЗОС – 76,6% и у контрольного сорта Каберне Совиньон – 78,3%. Основными показателями, характеризующими продуктивность сортов винограда, выступают коэффициенты плодоношения (К1) и плодоносности (К2), величина которых обусловлена генетически. В наших исследованиях коэффициент плодоношения в среднем по годам у всех исследуемых сортов, за исключением сорта Каберне АЗОС, превышал значение 1,0. Однако, коэффициент плодоносности у этого сорта составил 1,6.

Таблица 3 – Характеристика агробиологических показателей технических сортов винограда

Сорт/Год		Распустилось глазков, %	Плодоносных побегов, %	К1	К2	Средняя масса грозди, г	Урожайность, кг/куст
Достойный	2022	89,0	87,0	1,1	1,4	193,0	13,7
	2023	94,0	92,0	1,0	1,3	256,0	12,5
	2024	90,0	88,0	1,1	1,5	276,0	11,6
	среднее	91,0	89,0	1,1	1,4	241,7	12,6
Каберне АЗОС	2022	80,0	73,0	0,9	1,6	257,0	7,7
	2023	87,0	83,0	1,1	1,7	218,0	11,8
	2024	83,0	74,0	0,8	1,5	249,0	5,0
	среднее	83,3	76,6	0,9	1,6	241,3	8,2
Красностоп АЗОС	2022	90,0	93,0	1,0	1,4	95,0	4,4
	2023	86,0	81,0	1,0	1,6	154,0	7,1
	2024	86,0	82,0	1,0	1,6	120,0	4,4
	среднее	87,3	85,3	1,0	1,5	123,0	5,3
Кубанец	2022	84,0	81,0	1,0	1,5	224,0	13,1
	2023	85,0	82,0	1,3	1,8	254,0	19,1
	2024	83,0	78,0	0,9	1,4	282,0	7,2
	среднее	84,0	80,0	1,1	1,6	253,3	13,1
Каберне-Совиньон (контроль)	2022	89,0	86,0	1,1	1,5	240,0	15,5
	2023	79,0	73,0	0,9	1,5	230,0	5,9
	2024	82,0	76,0	0,9	1,7	238,0	4,7
	среднее	83,3	78,3	1,0	1,6	236,0	8,7
$НСР_{05}$		3,0	2,5	-	-	20,0	0,9

По урожайности выделились сорта Кубанец и Достойный. Сорт Кубанец среди всех сортов имеет наибольшую среднюю массу грозди – 253 г. Крупные грозди были также у сортов Достойный и Каберне АЗОС – 241,7 г и 241,3 г, соответственно. Сорт Красностоп АЗОС имел самую низкую урожайность за период исследований, однако именно этот сорт обладает самым высоким сахаронакоплением – 25,2 г/100 $см^3$ (табл. 4).

Таблица 4 – Характеристика показателей качества урожая технических сортов винограда

Название сорта	Дата сбора урожая	Массовая концентрация:		ГАП*
		сахаров, г/100 $см^3$	титруемых кислот, г/$дм^3$	
Достойный	14.09.2022	23,6	7,4	3,2
	13.09.2023	22,8	5,8	3,9
	25.08.2024	24,1	4,5	5,4
среднее		23,5	5,9	4,0
Каберне АЗОС	07.09.2022	20,5	5,5	3,7
	15.09.2023	22,8	6,5	3,5
	20.08.2024	24,1	4,3	5,6
среднее		22,5	5,4	4,2
Красностоп АЗОС	07.09.2022	25,8	5,2	5,0
	30.08.2023	23,6	5,4	4,4
	18.08.2024	26,3	4,6	5,7
среднее		25,2	5,1	4,9
Кубанец	15.09.2022	20,6	5,5	3,7
	26.09.2023	24,7	4,9	5,0
	25.08.2024	22,3	5,1	4,4
среднее		22,5	5,2	4,3
Каберне Совиньон (к)	26.09.2022	19,4	7,8	2,5
	02.10.2023	25,0	5,9	4,2
	17.09.2024	22,1	6,9	3,2
среднее		22,2	6,9	3,2
$НСР_{05}$		0,5	1,3	

** ГАП – глюкоацедометрический показатель*

Анализируя по годам условия периода созревания винограда, необходимо отметить, что в Черноморской агроклиматической зоне проявляется повышенный температурный режим с дефицитом осадков. Это приводит к более раннему сбору урожая и высокой концентрации сахара в ягодах. Так, в 2022–2023 годы уборка всех сортов проходила в сроки, близкие к среднемноголетним, а в 2024 году у сортов среднего срока созревания (Достойный, Каберне АЗОС и Красностоп АЗОС) период до сбора урожая сократился на 12…26 дней, а у позднего сорта Кубанец – на 21…32 дня.

При сборе урожая содержание сахаров в виноградном сусле у всей исследуемой группы технических сортов превышало величину этого показателя у контрольного сорта Каберне Совиньон. Исключением был 2023 год, когда контрольный сорт характеризовался лучшим сахаронакоплением.

Одним из основных показателей гармоничности вин выступает соотношение сахаров и кислот, которое выражают глюкоацедометрическим показателем (ГАП). Оптимальный ГАП сырья для производства красных сухих вин находится на уровне 3,2…4,0, красных десертных вин – > 4,0. В наших исследованиях оптимальные кондиции для приготовления сухих вин в 2022–2023 годы отмечены у сортов Достойный и Каберне АЗОС, в 2024 году – у контрольного сорта. Кондиции сусла сорта Кубанец соответствовали оптимальным для приготовления сухих вин только в 2022 году, в остальные годы они соответствовали показателю для десертных вин. Кондиции сорта Красностоп АЗОС во все годы исследований соответствовали показателю десертных вин.

Выводы. Сорта Каберне АЗОС, Красностоп АЗОС и Достойный в условиях Черноморской агроэкологической зоны Краснодарского края относятся к группе со средним сроком созревания. Сумма активных температур от распускания почек до полной зрелости ягод, необходимая для их вегетации, составляла 3008,4…3181,2°С. Сорт Кубанец и контрольный сорт Каберне Совиньон относятся к группе поздних. Для созревания этих сортов потребовалась сумма активных температур 3278,2…3565,2°С.

Наибольший в экспериментах коэффициент плодоносности (1,1) отмечен у сортов Достойный и Кубанец, коэффициент плодоношения (1,6) – у Каберне АЗОС, Кубанец, Каберне-Совиньон, урожайность – у сортов Достойный (12,6 кг/куст) и Кубанец (13,1 кг/куст). Среди всех сортов наибольшей средней массой грозди (253,3 г) отличался сорт Кубанец.

Технические сорта Достойный и Красностоп АЗОС характеризовались более высоким содержанием сахара – соответственно 22,8…24,1 г/100 $см^3$ и 23,6…26,3 г/100 $см^3$. Исключением был 2023 г., когда лучшим сахаронакоплением (25,0 г/100 см3) отличался контрольный сорт при самом позднем сроке уборке.

Оптимальный ГАП для производства сухих вин отмечен у сортов Достойный и Каберне АЗОС – соответственно 3,2…3,9 и 3,5…3,7. Сорта Кубанец и Красностоп АЗОС характеризовались более высоким ГАП – 4,4…5,0 и 4,4…5,7, что открывает возможности для использования их сырья при производстве десертных вин.

Литература

1.Катрюхин Б. А., Шелудько О. Н. Современное состояние виноделия в России: основные аспекты на примере Краснодарского края // Промышленная политика в Российской Федерации. 2025. № 1-3. С. 2–6.

2.Лукьянов А. А. Итоги научной деятельности Анапской зональной опытной станции виноградарства и виноделия – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» за 2023 год // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2024. № 85 (1). С. 46–58. doi: 10.30679/2219-5335-2024-1-85-46-58.

3.Автохтоны, аборигены и аллохтоны в российском виноделии / Е. А. Егоров, И. А. Ильина, Н. М. Агеева и др. // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2025. № 1 (399). С. 11–20. doi: 10.26297/0579-3009.2025.1.1.

4.Казахмедов Р. Э. Технология восстановления угнетенных филлоксерой корнесобственных растений винограда // Аграрная наука. 2025. № 2. С. 138–144. doi: 10.32634/0869-8155-2025-391-02-138-144.

5.Resistance of Grapevine Genotypes (Vitis spp.) to Daktulosphaira vitifoliae (Hemiptera: Phylloxeridae) in Brazil: Implications for Pest Management / S. Andzeiewski, D. C. Oliveira, D. Bernardi, et al. // Environmental Entomology. 2022. Vol. 51. No. 6. P. 1166–1171. doi: 10.1093/ee/nvac074.

6.Modern methods of Phylloxera-resistant Rootstock Vine growth and formation / L. Shavadze, M. Kevlishvili, M. Gagolishvili, et al. // International Research Journal of Engineering, IT and Scientific Research. 2022. Vol. 8. No. 3. P. 49–56. doi: 10.21744/irjeis.v8n3.2086.

7.Дергунов А. В., Курденкова Е. К. Влияние культуры ведения винограда и агротехнических приёмов на его урожайность и качество вина // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 2 (62). С. 11–15. doi: 10.12737/2073-0462-2021-11-15.

8.Instrumental assessment of the formation of the elemental composition of wines with various bentonite clays / Z. Temerdashev, A. Abakumov, M. Bolshov, et al. // Microchemical Journal. 2022. Vol. 175. P. 107145. URL: https://www.mdpi.com/1420-3049/29/10/2251 (дата обращения 15.05.2025). doi: 10.1016/j.microc.2021.107145.

9.Сидоров А., Юдич Ю. VII «Всероссийский саммит – 2017» в Абрау-Дюрсо. Подведение итогов и взгляд в будущее // Виноделие и виноградарство. 2017. № 5. С. 39–40.

10.Петров В. С., Алейникова Г. Ю., Марморштейн А. А. Методы исследований в виноградарстве. Краснодар: ФГБНУ СКФНЦСВВ, 2021. 147 с. ISBN 978-5-98272-139-6.

11.Лазаревский М. А. Изучение сортов винограда. Ростов-на-Дону: издательство Ростовского университета, 1963. 150 с.

Сведения об авторах:
Лукьянова Анна Александровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории виноградарства и виноделия, e-mail: lykanna@list.ru
Скосырская Даниэла Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории виноградарства и виноделия, e-mail: daniela_sko@mail.ru
Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия – филиал Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства и виноградарства, Анапа, Россия.

AGROBIOLOGICAL EVALUATION OF A GROUP OF TECHNICAL GRAPE VARIETIES IN BLACK SEA AGROECOLOGICAL ZONE OF KRASNODAR KRAI

A. A. Lukyanova, D. Yu. Skosyrskaya

Abstract. The study was conducted with the aim to examine the agrobiological characteristics of a group of locally bred technical grape varieties (Dostoinyy, Kaberne AZOS, Krasnostop AZOS, Kubanets), obtained as a result of crosses of high-quality grape varieties with the Phylloxera-resistant Dzhemete variety, in the Black Sea agroecological zone of Krasnodar Krai. The study was conducted at Anapa ampelographic collection using standard methods. The duration of phenological period from the beginning of budding phases to the beginning of flowering was reduced for all varieties in 2024 compared to 2022-2023 and was minimal in the experiment for Kaberne AZOS and Krasnostop AZOS (43 days). Based on the results for 2022-2024, Kaberne AZOS, Krasnostop AZOS and Dostoynyy were classified as mid-season ripening, while Kubanets and Kaberne Sauvignon (control) were classified as late-ripening varieties. The highest number of blossomed and fruiting shoots was recorded for Dostoynyy – 89-94% and 87-92%, respectively. The coefficients fruiting and fruitfulness for all studied varieties exceeded 1.0 excepted Kaberne AZOS variety. The highest yields in the trial were observed for Kubanets and Dostoynyy varieties – 13.0 kg/plant and 12.6 kg/plant, respectively. Dostoynyy (3.2-3.9) and Kaberne AZOS (3.5-3.7) varieties demonstrated optimal glucoacetometric conditions for dry wine production in 2022-2023, while the control variety did so in 2024. Kubanets (3.7) must conditions were optimal for dry wine production only in 2022; in the remaining years, they, like the Krasnostop AZOS variety throughout the study period, met the parameters suitable for dessert wines.

Key words: grapes *(Vitis L.),* technical varieties, phenology, agrobiology, yield, harvest conditions.

References

1. Katryukhin BA, Sheludko ON. [Modern state of winemaking in Russia: main aspects using Krasnodar Krai as an example]. Promyshlennaya politika v Rossiyskoy Federatsii. 2025; 1-3. 2-6 p.
2. Lukyanov AA. [Results of scientific activities of Anapa Zonal Experimental Station of Viticulture and Winemaking – a branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture and Winemaking” for 2023]. Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii. 2024; 85 (1). 46-58 p. doi: 10.30679/2219-5335-2024-1-85-46-58.
3. Egorov EA, Ilina IA, Ageeva NM. [Autochthons, aborigines and allochthons in Russian winemaking]. Pishchevaya tekhnologiya. 2025. № 1 (399). S. 11–20. doi: 10.26297/0579-3009.2025.1.1.
4. Kazakhmedov RE. [Technology for restoring rootstocks of grape plants oppressed by phylloxera]. Agrarnaya nauka. 2025; 2. 138-144 p. doi: 10.32634/0869-8155-2025-391-02-138-144.
5. Andzeiewski S, Oliveira DC, Bernardi D. Resistance of grapevine genotypes *(Vitis spp.)* to Daktulosphaira vitifoliae (Hemiptera: Phylloxeridae) in Brazil: Implications for pest management. Environmental Entomology. 2022; Vol.51. No.6. 1166-1171 p. doi: 10.1093/ee/nvac074.
6. Shavadze L, Kevlishvili M, Gagolishvili M. Modern methods of Phylloxera-resistant rootstock vine growth and formation. International Research Journal of Engineering, IT and Scientific Research. 2022; Vol.8. No.3. 49-56 p. doi: 10.21744/irjeis.v8n3.2086.
7. Dergunov AV, Kurdenkova EK. [Influence of grape growing culture and agrotechnical methods on its yield and wine quality]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 2 (62). 11-15 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-11-15.
8. Temerdashev Z, Abakumov A, Bolshov M. Instrumental assessment of the formation of the elemental composition of wines with various bentonite clays. [Internet]. Microchemical Journal. 2022; Vol.175. 107145 p. [cited 2025, May 15]. Available from: https://www.mdpi.com/1420-3049/29/10/2251. doi: 10.1016/j.microc.2021.107145.
9. Sidorov A, Yudich Yu. [VII All-Russian Summit - 2017 in Abrau-Durso. Summarizing and a look to the future]. Vinodelie i vinogradarstvo. 2017; 5. 39-40 p.
10. Petrov VS, Aleynikova GYu, Marmorshteyn AA. Metody issledovaniy v vinogradarstve. [Research methods in viticulture]. Krasnodar: FGBNU SKFNTsSVV. 2021; 147 p. ISBN 978-5-98272-139-6.
11. Lazarevskiy MA. Izuchenie sortov vinograda. [Study of grape varieties]. Rostov-on-Don: izdatelstvo Rostovskogo universiteta. 1963; 150 p.

Authors:
Lukyanova Anna Aleksandrovna – Ph.D. of Biological Sciences, senior researcher of Viticulture and Winemaking Laboratory, e-mail: lykanna@list.ru
Skosyrskaya Daniela Yurevna – junior researcher of Viticulture and Winemaking Laboratory, e-mail: daniela_sko@mail.ru
Anapa Zonal Experimental Station of Viticulture and Winemaking – Branch of North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture and Viticulture, Anapa, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-58-62
УДК 635.658:631.523

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНОВ ПРИГОДНОСТИ К МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УБОРКЕ СРЕДИ СОРТООБРАЗЦОВ ЧЕЧЕВИЦЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ

Т. В. Маракаева

Реферат. Использование молекулярно-генетических методов в селекции значительно сокращает время создания высокотехнологичных сортов. Цель исследований – выявление KASP (Competitive Allele Specific PCR)-маркеров, ассоциированных с генами признаков пригодности к механизированной уборке в коллекционном и селекционном материале чечевицы, а также эффективных SNP (Single Nucleotide Polymorphism)-локусов для маркер-ориентированной селекции в условиях Западной Сибири. Работу выполняли в 2022–2024 годы в Омской области. Изучали коллекцию из 84 отечественных образцов чечевицы с использованием общепринятых селекционных методик. Проводили анализ признаков пригодности к механизированной уборке и идентификацию локусов, ассоциированных с этими признаками методом KASP по девяти маркерам. Доля образцов с благоприятным аллелем степени облиственности в зависимости от группы по географическому происхождению составляла 11,6…25,0%, ветвистости – 12,5…44,1%, высоты прикрепления бобов – 48,1…62,5%, темпа роста – 8,1…37,6%, нерастрескиваемости бобов – 23,2…75,0%, высоты растения – 5,4…37,5%). Влияние ветвистости и облиственности (LcRBContig00050 и LcRBContig00065) на устойчивость к полеганию, выраженное в уменьшении вегетативной массы растения, статистически значимо и составляет 10…30%. Наличие благоприятного аллеля маркеров скорости роста (LcRBContig00079 и LcRBContig00158) достоверно увеличивает прирост растений на ранних этапах на 0,35…0,91 см. KASP-маркеры LcRBContig01123 и LcRBContig0534 связаны с увеличением высоты растения на 2…8 см, прикрепления бобов – на 1…4 см. Ассоциированный с нерастрескиваемостью бобов SNP (LcRBContig00067) позволяет увеличить долю нерастрескивающихся бобов в период созревания чечевицы до 90%. В результате исследований отобраны перспективные линии чечевицы питомника КСИ омской селекции, которые превосходят стандарт по технологичности – Л 18-20, Л 12-20, Л 03-20.

Ключевые слова: тарелочная чечевица (*Lens culinaris*), коллекционный образец, пригодность к механизированной уборке, KASP-маркеры.

Введение. Сегодня рынок сельскохозяйственной продукции предлагает достаточно широкий ассортимент российских сортов чечевицы. Однако в связи со значительной изменчивостью климата, выраженной в неравномерности осадков, нестабильности температуры и влажности воздуха, для сибирских регионов актуальным выступает создание сортов чечевицы с высоким уровнем пригодности к механизированной уборке в условиях конкретного региона [1]. Из-за довольно сильной подверженности погодным условиям признаки технологичности очень изменчивы [2]. Первостепенными параметрами, по которым определяют пригодность любого сорта чечевицы к механизированной уборке, считаются высота растения, высота расположения нижних бобов и устойчивость к полеганию [3]. Наличие значительного генетического полиморфизма сортов чечевицы по вышеуказанным показателям может быть задействовано при получении высокотехнологичных сортов сибирской селекции [4]. Широкое применение при генотипировании сельскохозяйственных культур получила технология KASP (Kompetitive Allele-Specific PCR). Эта платформа спроектирована для расширения возможностей метода SNP-типирования на основе чипов [5]. При этом отмечают повышение производительности и эффективности в области исследования генотипических особенностей чечевицы, а также сокращение материально-финансовых затрат [6]. Применение технологии KASP при генетических исследованиях чечевицы позволяет выявить генотипы, обладающие комбинацией полезных аллелей, которые в последующем возможно включить в программу скрещиваний [7].

Цель исследований – идентификация генов, контролирующих признаки пригодности к механизированной уборке у российских сортов чечевицы.

Условия, материалы и методы. Коллекцию сортообразцов чечевицы оценивали в течение трех вегетационных сезонов (2022–2024 годы) на территории Учебно-опытного хозяйства Омского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (г. Омск). Исследовали 84 российских образца чечевицы различного географического происхождения (см. рис. 1).

В качестве стандарта был взят среднеранний сорт Аида (оригинатор – Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур (ВНИИЗБК, г. Орел). Посев сортообразцов коллекционного питомника проводили сеялкой ССФК-7 во второй декаде мая на делянках с учетной площадью 1 м^2. Норма высева – 1,2 млн всхожих семян на 1 га. Повторность в опыте четырехкратная. Размещение делянок систематическое. Участок расположен на лугово-черноземной среднемощной малогумусовой среднесуглинистой почве. По результатам агрохимического анализа она характеризуется следующими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) составляет 3,95%, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно 154 мг/кг и 236 мг/кг, кислотность почвы близка к нейтральной ($pH_{сол.}$ 6,5), сумма обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} (по ГОСТ 26423-85) – соответственно 15,8 и 5,7 ммоль/100 г.

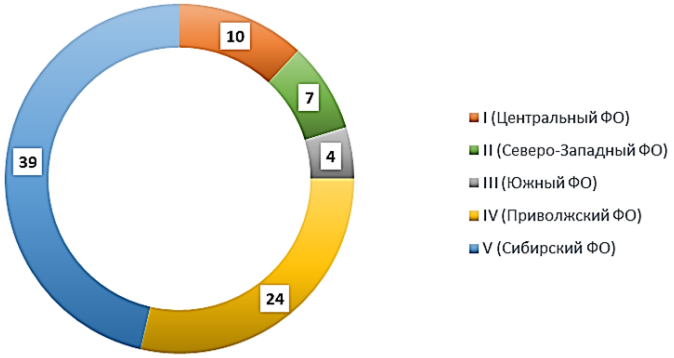


Рис. 1 – Распределение изученных сортообразцов чечевицы по географическим группам происхождения

За последние пять лет в Омской области отмечены существенные изменения погодных условий. Из-за неравномерности выпадения осадков в большинстве муниципальных районов региона все чаще стали отмечать суховеи и засушливую погоду в период посевной кампании, а в уборку – переувлажнение. Аграрии южной зоны области почти каждое лето сталкиваются с почвенной засухой. Зимы становятся мягче, весна наступает раньше, сезон осенних сельскохозяйственных работ переносится на более поздний период, а вегетационный период увеличивается [8]. Зарегистрированные погодные явления в рассматриваемые годы служат этому доказательством. За вегетационный период чечевицы установлено превышение суммы активных температур ($t \geq 10^{o}C$) над климатической нормой (2173°С) на 315°С в 2022 году, 2023 год – на 310°С, 2024 год – на 275°С. По объему осадков также отмечено превышение над нормой на 30,7% в 2022 году (287,6 мм), на 3,2% – в 2024 году, а в 2023 году зафиксирован недобор осадков на 8,5% в сравнении со среднемноголетним значением (187,2 мм). В конечном итоге в 2022 и 2024 годы сформировались слабо засушливые условия (ГТК=1,02 и ГТК=1,21 соответственно) и очень засушливые в 2023 году (ГТК=0,75) [9].

Исследования проводили в полевых и лабораторных условиях по методике Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [10] и методическим указаниям ВИР по изучению зернобобовых культур [11]. Для выполнения генотипирования были отобраны свежие листья растений чечевицы на тридцатый день после посева. Генетические исследования образцов чечевицы выполнены методом KASP по девяти маркерам, связанным с признаками, определяющими пригодность к машинной уборке.

Статистическая обработка результатов исследований проведена с использованием дисперсионного анализа и описательной статистики [12], а также пакетов прикладных программ Microsoft Excel и SPSS PASW Statistics 20.0. Достоверность различий между сравниваемыми группами оценивали с использованием t-критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение. Анализ полученных в результате генотипирования данных нескольких географических групп сортообразцов чечевицы выявил генетические отличия по частоте встречаемости SNP-локусов, которые определяют признаки технологичности (табл. 1). KASP-маркер, отвечающий за степень облиственности растения, идентифицирован у 25,0% образцов первой группы (Центральный федеральный округ (ФО), 13,5% – второй (Северо-Западный ФО), 11,6% – третьей (Южный ФО), 15,0% – четвертой (Приволжский ФО) и 16,7% – пятой (Сибирский ФО). Маркеры, сцепленные с генами степени ветвистости и высоты расположения бобов зафиксированы среди образцов всех групп. Доля образцов с «благоприятным аллелем» этих признаков составила 12,5…44,4% и 48,1…62,5% соответственно.

Таблица 1 – Основные KASP-маркеры, ассоциированные с генами пригодности к механизированной уборке чечевицы

KASP ID	Признак	Доля образцов с «благоприятным аллелем», %				
		I*	II	III	IV	V
LcRBContig00050	степень облиственности	25,0	13,5	11,6	15,0	16,7
LcRBContig00065	степень ветвистости	12,5	21,6	37,7	44,4	23,9
LcRBContig00079	темп роста	12,5	8,1	17,4	37,6	12,7
LcRBContig00158	темп роста	25,0	16,2	20,3	42,3	20,5
LcRBContig00534	высота расположения бобов	62,5	32,4	49,3	53,8	48,1
LcRBContig00133	характер ветвления	37,5	10,8	26,1	14,9	24,8
LcRBContig00805	характер ветвления	50,0	29,7	40,6	29,1	40,1
LcRBContig01123	высота растения	37,5	5,4	43,5	22,3	28,8
LcRBContig00067	нерастрескиваемость бобов	75,0	37,8	23,2	27,2	45,3

**I – сортообразцы из Центрального ФО; II – из Северо-Западного ФО; III – из Южного ФО; IV– из Приволжского ФО; V – из Сибирского ФО*

Доля образцов с «благоприятным аллелем», контролирующим темп роста растения чечевицы, варьировала от 8,1 до 37,6% в зависимости от группы происхождения. Основными источниками нерастрескиваемости бобов могут служить образцы селекции Центрального федерального округа (75,0%), некоторые образцы омской и алтайской селекции (45,3%), а также образцы из Ленинградской области (37,8%). Маркеры, сцепленные с геном высоты растения, вносящим значительный вклад в пригодность к механизированной уборке зафиксирован у образцов всех изученных групп. Доля образцов с «благо-приятным аллелем» этого признака составила 5,4…37,5%.

Фенологическая оценка пяти групп сортообразцов в полевых и лабораторных условиях помогла установить влияние конкретных генов на проявление признаков, определяющих пригодность к механизированной уборке (табл. 2).

Таблица 2 – Вклад KASP-маркеров в фенотипическое проявление признаков пригодности к механизированной уборке, 2022–2024 годы

KASP ID	Благоприятный аллель	Год	Критерий Стьюдента (p)	R^2, %	SNP-эффект
Степень облиственности, %					
LcRBContig00050	**A**/G	2022	0,014	8,21	-13,7
		2023	0,10	5,13	-10,7
		2024	0,017	10,82	-14,5
Степень ветвистости, балл					
LcRBContig00065	**A**/G	2022	0,011	5,81	-0,41
		2023	0,82	1,11	-0,01
		2024	0,031	8,93	-0,52
Темп роста, см/сут.					
LcRBContig00079	A/**G**	2022	0,038	5,46	0,54
		2023	0,021	6,62	0,41
		2024	0,051	7,81	2,55
LcRBContig00158	A/**M**	2022	0,015	5,11	0,61
		2023	0,018	7,31	0,46
		2024	0,028	4,82	0,71
Высота расположения бобов, см					
LcRBContig00534	A/**G**	2022	0,05	5,22	1,72
		2023	0,10	2,85	0,30
		2024	0,011	6,44	3,48
Характер ветвления, балл					
LcRBContig00133	A/**G**	2022	0,015	4,82	1,58
		2023	0,025	5,73	1,18
		2024	0,016	6,81	1,74
LcRBContig00805	A/**G**	2022	0,034	8,49	0,42
		2023	0,027	5,83	0,29
		2024	0,021	6,53	1,65
Высота растения, см					
LcRBContig01123	A/**G**	2022	0,68	2,34	1,77
		2023	0,093	4,91	6,70
		2024	0,018	7,74	7,95
Нерастрескиваемость бобов, %					
LcRBContig00067	A/**G**	2022	0,018	8,31	4,16
		2023	0,030	6,45	3,31
		2024	0,001	10,91	4,78

Статистическая обработка полученных результатов выявила, что все гены, идентифицированные с использованием технологии KASP, внесли определенный вклад в пригодность растений чечевицы к механизированной уборке в течение всего периода изучения. Для признака степень облиственности растения выявлен один SNP (LcRBContig00050) с фенотипической дисперсией облиственности по маркеру LcRBContig00050 5,21…6,83%.

Наличие благоприятных аллелей LcRBContig00050 и LcRBContig00065 уменьшает вегетативную массу растения на 10…30% вследствие снижения степени ветвистости и облиственности, тем самым увеличивая устойчивость к полеганию агрофитоценоза чечевицы в пределах 15…20%. Для признака темп роста выявлено два SNP (LcRBContig00079 и LcRBContig00158) с долей фенотипической изменчивости, объясняемой структурой популяции 4,82…7,81%. Благоприятный аллель этих маркеров статистически значимо ускоряет среднесуточный прирост растения на 0,35…0,91 см на ранних этапах развития.

Высота растения играет ключевую роль при механизированной уборке чечевицы и влияет на результаты полученного урожая. Наличие SNP LcRBContig01123 значительно увеличивает этот показатель (на 2…8 см). На высоту расположения нижних бобов благоприятно оказывает влияние SNP LcRBContig0534, повышая ее на 1…4 см, что положительно сказывается на снижении производственных потерь зерна. Нерастрескиваемость бобов в период созревания входит в категорию важных показателей технологичности, для которого в ходе исследований также установлен ассоциированный SNP (LcRBContig00067). Положительный эффект этого маркера заключается в увеличении доли нерастрескиваемых бобов до 90%.

В результате исследований отобраны наиболее перспективные селекционные линии чечевицы Омского ГАУ (табл. 3). У всех отобранных линий в генотипе присутствуют желательные аллели генов, отвечающих за высоту растения (LcRBContig01123), высоту прикрепления нижних бобов (LcRBContig0534), характер ветвления (LcRBContig00133 и LcRBContig00805) и нерастрескиваемость бобов (LcRBContig00067). В нестабильных климатических условиях Омской области у выделенных селекционных линий питомника КСИ высота растений была больше 43 см, высота расположения нижних бобов – выше 23 см, средняя степень облиственности – 45…48%, степень ветвистости – слабая, среднесуточный прирост – 0,72…0,80 см/сут., характер ветвления по всему стеблю – оптимальный, нерастрескиваемость бобов – высокая (85…90%).

Таблица 3 – Характеристика перспективных линий чечевицы КСИ, выделенных с использованием KASP-маркеров (в среднем за 2022–2024 годы)

Признак	Аида, стандарт	Л 18-20	Л 12-20	Л 03-20	$НСР_{05}$
Высота растения, см	31,6	45,2	43,7	45,1	8,61
Высота расположения бобов, см	18,4	23,1	26,1	25,4	2,06
Степень ветвистости, балл	3*	3*	3*	3*	-
Степень облиственности, %	54	46	45	48	3,58
Темп роста, см/сут.	0,69	0,76	0,80	0,72	0,12
Характер ветвления, балл	7**	7**	7**	7**	-
Нерастрескиваемость бобов, %	73	88	85	90	9,74

**слабая степень ветвистости (1…4 ветви)*
***характер ветвления по всему стеблю*

Выводы. По результатам генотипирования с использованием технологии KASP по девяти маркерам, сопряженным с признаками пригодности к механизированной уборке доля образцов чечевицы с наличием благоприятного аллеля по степени облиственности растений в зависимости от географического происхождения составляла 11,6…25,0%, по степени ветвистости – 12,5…44,1%, по высоте расположения бобов – 48,1…62,5%, по темпу роста растения чечевицы – 8,1…37,6%, по нерастрескиваемости бобов – 23,2…75,0%, по высоте растения – 5,4…37,5%.

Наличие благоприятных аллелей маркеров темпа роста (LcRBContig00079 и LcRBContig00158) статистически достоверно увеличивает среднесуточный прирост растения на начальных стадиях развития на 0,35…0,91 см. Существенный вклад в увеличение высоты растения на 2…8 см и расположения нижних бобов на 1…4 см вносили KASP-маркеры LcRBContig01123 и LcRBContig0534. Ассоциированный с нерастрескиваемостью бобов SNP (LcRBContig00067) позволяет повысить величину этого показателя в период созревания чечевицы до 90%.

На основе KASP-маркеров отобраны перспективные линии чечевицы питомника КСИ селекции Омского ГАУ с набором генов пригодности к механизированной уборке, которые достоверно превосходят стандарт по технологичности – Л 18-20, Л 12-20, Л 03-20.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20033, https://rscf.ru/project/24-26-20033/

Литература

1. Быкова В. А. Производство зерновых и зернобобовых культур в Сибирском федеральном округе в контексте обеспечения продовольственной безопасности // Продовольственная политика и безопасность. 2023. Т. 10. № 3. С. 471–482. doi: 10.18334/ppib.10.3.118249.

2. Зотиков В. И., Вилюнов С. Д. Современная селекция зернобобовых и крупяных культур в России // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25. № 4. С. 381–387. doi: 10.18699/VJ21.041.

3. Технологический потенциал зернобобовых культур / Д. П. Волков, О. С. Башинская, С. А. Зайцев и др. // АгроЭкоИнфо. 2023. № 3 (57). URL: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/3/st_305.pdf (дата обращения: 10.03.2025). doi: 10.51419/202133305.

4. Видовое разнообразие коллекции генетических ресурсов зернобобовых ВИР и его использование в отечественной селекции (обзор) / М. А. Вишнякова, Т. Г. Александрова, Т. В. Буравцева и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 2. С. 109–123. doi: 10.30901/2227–8834–2019–2– 109–123.

5. KASP-IEva: an intelligent typing evaluation model for KASP primers / X. Chen, L. Huang, J. Fan, et al. // Frontiers in Plant Science. 2024. Vol. 14. URL: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389fpls.2023.1293599/full (дата обращения: 10.03.2025). doi: 10.3389/fpls.2023.1293599.

6. Identification of stable lentil genotypes through genotype by environment interactions on yield potential in Morocco / A. Baggar, A. Safi, F. Gaboun, et al. // Plant Science Today. 2022. URL: https://horizonepublishing.com/

journals/index.php/PST/article/view/1814/1649 (дата обращения: 15.03.2025). doi: 10.14719/pst.1814.

7. RNA-Seq analysis and development of SSR and KASP markers in lentil (Lens culinaris Medikus subsp. culinaris) / D. Wang, N. Li, X. Wang, et al. // The Crop Journal. 2020. Vol. 8, No. 6. P. 953-965. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514120300763 (дата обращения: 10.03.2025). doi: 10.1016/j.cj.2020.04.007.

8. Аксенова Ю. В., Шмидт А. Г. Оценка природно-ресурсного потенциала земледельческой территории Омской области // Российская сельскохозяйственная наука. 2024. № 3. С. 8–14. doi: 10.31857/S2500262724030021.

9. Маракаева Т. В. Оценка образцов тарелочной чечевицы по хозяйственно-биологическим показателям // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 4(76). С. 49-55. doi: 10.12737/2073-0462-2024-49-55.

10. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. 2019. Вып. 1. 329 с. URL: https:// https://gossortrf.ru/publication/metodiki-po-ksi.php (дата обращения: 23.03.2025).

11. Методические указания по изучению коллекции зерновых бобовых культур / сост. Н. И. Корсаков, О. П. Адамова, В. И. Буданова и др.; ВАСХНИЛ, Всесоюз. науч.-исслед. ин-т растениеводства им. Н. И. Вавилова. Л.: ВИР, 1975. 59 с.

12. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 6-е, стереотип., перепеч. с 5-го изд. М.: Альянс, 2014. 352 с.

Сведения об авторе:

Маракаева Татьяна Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрономии, селекции и семеноводства, e–mail: tv.marakaeva@omgau.org

Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, Омск, Россия.

IDENTIFICATION OF SUITABILITY GENES TO MECHANICAL HARVESTING AMONG DOMESTIC LENTIL VARIETIES

T. V. Marakaeva

Abstract. The use of molecular genetic methods in lentil breeding significantly reduces the time required to develop high-tech varieties. The aim of this study was to identify CASP (Competitive Allele Specific PCR) markers associated with genes encoding mechanical harvesting suitability traits in lentil collection and breeding material, as well as effective SNP (Single Nucleotide Polymorphism) loci for marker-assisted selection in Western Siberia. The study was conducted from 2022 to 2024 in Omsk region. A collection of 84 domestic lentil accessions was studied using generally accepted breeding methods. Analysis of the traits for mechanical harvesting suitability and identification of the loci associated with these traits were carried out using CASP method for nine markers. The proportion of samples with a favorable allele of the degree of foliage depending on group by geographical origin was 11.6...25.0%, branching - 12.5...44.1%, pod attachment height - 48.1...62.5%, growth rate - 8.1...37.6%, pod desquamation - 23.2...75.0%, plant height - 5.4...37.5%. The effect of branching and foliage (LcRBContig00050 and LcRBContig00065) on lodging resistance, expressed as a decrease in vegetative plant mass, is statistically significant and amounts to 10...30%. The presence of a favorable allele of growth rate markers (LcRBContig00079 and LcRBContig00158) significantly increases plant growth in the early stages by 0.35-0.91 cm. CASP markers LcRBContig01123 and LcRBContig0534 are associated with an increase in plant height by 2-8 cm and bean attachment by 1-4 cm. An SNP associated with bean non-dehiscence (LcRBContig00067) allows for an increase in the proportion of non-dehiscence beans during lentil maturation to 90%. As a result of the research, promising lentil lines from KSI nursery, selected in Omsk, which exceed the standard in terms of technological effectiveness, were selected – L 18-20, L 12-20, L 03-20.

Key words: plate lentil (*Lens culinaris*), collection accession, suitability for mechanical harvesting, CASP markers.

References

1. Bykova VA. [Production of grain and leguminous crops in Siberian Federal District in the context of food security]. Prodovolstvennaya politika i bezopasnost. 2023; Vol.10. 3. 471-482 p. doi: 10.18334/ppib.10.3.118249.

2. Zotikov VI, Vilyunov SD. [Modern breeding of leguminous and cereal crops in Russia]. Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii. 2021; Vol.25. 4. 381-387 p. doi: 10.18699/VJ21.041.

3. Volkov DP, Bashinskaya OS, Zaytsev SA. Technological potential of grain leguminous crops. [Internet]. AgroEkoInfo. 2023; 3 (57). [cited 2025, March 10]. Available from: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/3/st_305.pdf. doi: 10.51419/202133305.

4. Vishnyakova MA, Aleksandrova TG, Buravtseva TV. [Species diversity of VIR legume genetic resources collection and its use in domestic breeding (review)]. Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2019; Vol.180. 2. 109-123 p. doi: 10.30901/2227–8834–2019–2– 109–123.

5. Chen X, Huang L, Fan J. KASP-IEva: an intelligent typing evaluation model for KASP primers. [Internet]. Frontiers in Plant Science. 2024; Vol.14. [cited 2025, March 10]. Available from: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389fpls.2023.1293599/full. doi: 10.3389/fpls.2023.1293599.

6. Baggar A, Safi A, Gaboun F. Identification of stable lentil genotypes through genotype by environment interactions on yield potential in Morocco. [Internet]. Plant Science Today. 2022; [cited 2025, March 15]. Available from: https://horizonepublishing.com/journals/index.php/PST/article/view/1814/1649. doi: 10.14719/pst.1814.

7. Wang D, Li N, Wang X. RNA-Seq analysis and development of SSR and KASP markers in lentil (Lens culinaris Medikus subsp. culinaris). [Internet]. The Crop Journal. 2020; Vol.8, No.6. 953-965 p. [cited 2025, March 10]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514120300763. doi: 10.1016/j.cj.2020.04.007.

8. Aksenova YuV, Shmidt AG. [Assessment of natural resource potential of the agricultural territory of Omsk region]. Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka. 2024; 3. 8-14 p. doi: 10.31857/ S2500262724030021.

9. Marakaeva TV. [Evaluation of plate lentil samples by economic and biological indicators]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 4(76). 49-55 p. doi: 10.12737/2073-0462-2024-49-55.

10. Methodology of state variety testing of agricultural crops. [Internet]. State Commission for Variety Testing. 2019; issue 1. 329 p. [cited 2025, March 23]. Available from: https:// https://gossortrf.ru/publication/metodiki-po-ksi.php.

11. Korsakov NI, Adamova OP, Budanova VI. Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu kollektsii zernovykh bobovykh kultur. [Methodological guidelines for studying the grain legumes collection]. VASKhNIL, Vsesoyuz. nauch.-issled. in-t rastenievodstva im.N.I.Vavilova. Leningrad: VIR. 1975; 59 p.

12. Dospekhov BA. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy). [Methodology of field experiment (with the basics of statistical processing of research results)]. 6th edition, stereotype, reprinted from 5th edition. Moscow: Alyans. 2014; 352 p.

Author:

Marakaeva Tatyana Vladimirovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of Agronomy, Breeding and Seed Production Department, e-mail: tv.marakaeva@omgau.org

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-63-69
УДК 633.853.483:633.853.483:632.4

ВЛИЯНИЕ СЕРОЙ ГНИЛИ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ОЗИМЫХ РАПСА И ГОРЧИЦЫ САРЕПТСКОЙ

О. А. Сердюк

Реферат. К одной из вредоносных болезней, поражающих озимые рапс и горчицу сарептскую, относится серая гниль. Цель исследований – определение влияния поражения озимых рапса и горчицы сарептской серой гнилью на снижение продуктивности растений на черноземе выщелоченном в условиях степной зоны Западного Предкавказья. Работу выполняли в 2010–2020 годы. Объектами исследования служили возбудитель болезни гриб *Botrytis cinerea Pers*. и сорта рапса озимого Дракон, Элвис, Лорис, горчицы сарептской – Джуна. Вредоносность серой гнили (снижение продуктивности растений) рассчитывали по степени поражения. Статистическую обработку данных проводили с использованием метода простой корреляции и t-критерия Стьюдента. Метеоусловия благоприятствовали развитию *B. cinerea* в посевах культур во 2 декаде июня в 2011, 2014, 2017 и 2020 годы при ГТК = 1,1…2,7 в сочетании с высокой относительной влажностью воздуха (63…77%). Средняя масса семян со стручка уменьшалась в зависимости от степени поражения растения в 1,1…3,1 раза. Корреляционная связь между средней массой семян в стручке и баллом поражения озимых рапса и горчицы сарептской болезнью сильная, прямолинейная, обратная (отрицательная). Коэффициенты простой корреляции составили соответственно -0,93 и -0,96, коэффициенты детерминации – 0,86 и 0,92. В относительном выражении вредоносность болезни на озимых рапсе и горчице сарептской в среднем составила 33,3 и 32,1%.

Ключевые слова: рапс озимый (*Brassica napus L.*), горчица сарептская озимая (*Brassica juncea L.*), серая гниль (*Botrytis cinerea Pers*.), продуктивность растений, вредоносность.

Введение. Представители семейства Капустные: рапс (*Brassica napus L.*) и горчица сарептская (*Brassica juncea L.*) выступают важными масличными культурами, возделываемыми во многих странах мира. Семена этих культур используют для производства масла пищевого и технического назначения (в качестве биодизеля) [1, 2, 3]. Шрот, остающийся после отжима масла, используют в качестве корма для сельскохозяйственных животных [4, 5, 6]. Растения рапса и горчицы сарептской, достигшие фазы цветения, запахивают, применяя их в качестве зеленого удобрения, улучшающего качество почвы и обеззараживающего ее [7]. Производители сельскохозяйственной продукции возделывают как озимую, так и яровую форму этих культур.

Исследования, проведенные в разных странах мира, показывают, что в течение вегетации растения рапса и горчицы сарептской поражаются спектром болезней, вызываемых патогенами разной этиологии: бактериями, вирусами, нематодами, фитоплазмами, грибоподобными организмами, грибами. Видовой состав возбудителей, частота встречаемости и вредоносность болезней на культурах различны в зависимости от региона возделывания. Одни болезни не наносят вред урожаю этих культур (пероноспороз, мучнистая роса и др.) [8, 9, 10], под влиянием других (фомоз, склеротиниоз, альтернариоз, фитоплазмоз и др.) качественные и количественные показатели урожая могут значительно снижаться [9, 10, 11].

К одной из вредоносных болезней, поражающих озимые рапс и горчицу сарептскую, относится серая гниль. Более 30 видов рода *Botrytis P.* Micheli ex Pers. встречается у порядка 1400 видов растений. Однако наиболее вредоносным для большинства сельскохозяйственных культур выступает вид *Botrytis cinerea Pers.* (анаморфная стадия гриба *Botryotinia fuckeliana* (de Bary) Whetzel) [12].

Попадая на ослабленные ткани или в места повреждений (травм) поверхности органов растений, возбудитель болезни *B. cinerea* выделяет токсины и разрушает стенки клеток тканей, создавая тем самым питательную среду для своего дальнейшего роста [13].

Поражение листьев, стеблей, цветов и плодов растений этим патогеном в условиях, способствующих развитию болезни (высокая влажность в посевах вследствие большого количества осадков или при обильных росах в сочетании со средней температурой воздуха 10…25°С) приводит к значительному снижению урожая культур (от 10 до 70% и даже до 100%) [14, 15, 16], особенно культур с сочными плодами: земляники, малины, томата, винограда, огурца, киви и др. [15, 16]. Так, при выращивании томата в тепличных условиях некрозы, вызываемые *B. cinerea*, появляются на горизонтально расположенных отплодоносивших участках стебля. Больные растения отстают в росте, постепенно желтеют и увядают. Кроме этого, осыпаемость плодов резко увеличивается [13]. Поражение моркови серой гнилью приводит к потемнению и размоканию тканей корнеплодов. При проведении исследований в 2018–2019 годы в Белорусии распространенность серой гнили на моркови при хранении составила 0,5…3,5 и 0,3….8,6%, что нанесло значительный ущерб урожаю, так как поражение корнеплодов болезнью ухудшило их потребительские качества и пищевую ценность, пораженные корнеплоды подлежали уничтожению [17].

На растениях рапса в местах поражения образуются бурые пятна, покрывающиеся густым серым или серо-зеленым спороношением – налетом, состоящим из гиф и

разветвленных конидиеносцев, на которых образуются конидии анаморфной стадии гриба. Развитию болезни способствуют также подмораживание растений и различные повреждения, например, растрескивание стеблей при большом количестве осадков и резкой смене температуры воздуха. Стручки рапса могут поражаться патогеном во время затянувшейся уборки при повышенном количестве осадков [11].

Ученые в разных странах проводят селекцию на устойчивость к серой гнили, однако сортов культур, иммунных к этой болезни, пока не создано [18]. Для определения необходимости проведения защитных мероприятий посевов для снижения негативного воздействия болезни на урожай культур, необходимо иметь информацию не только о распространенности и развитии болезни, но и о влиянии ее на продуктивность растений той или иной культуры. Снижение продуктивности растений сельскохозяйственных культур вследствие поражения серой гнилью в разной степени характеризует ее вредоносность, показатели которой выражают в процентах от продуктивности здоровых растений.

Цель исследования – определение влияния поражения озимых рапса и горчицы сарептской серой гнилью на снижение продуктивности растений на черноземе выщелоченном в условиях степной зоны Западного Предкавказья для совершенствования системы защиты культур.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли на черноземе выщелоченном в 2010–2011 годы на 1-ом отделении ВНИИМК (г. Краснодар), в 2012–2020 годы – на 2-ом отделении ВНИИМК (г. Краснодар, х. Октябрьский). Во все годы исследований фиксировали погодные условия, складывающиеся в течение 2 декады июня, – среднюю температуру воздуха и количество выпавших осадков. На основании этих данных рассчитывали гидротермический коэффициент (ГТК), который служит интегральным показателем увлажнения окружающей среды, а также среднюю относительную влажность воздуха.

Степень увлажнения среды в зависимости от величины ГТК классифицировали следующим образом:

- при ГТК менее 0,5 – слабое увлажнение территории (сильная засуха);
- при ГТК от 0,5 до 1,0 – недостаточное увлажнение (средняя засуха);
- при ГТК от 1,0 до 1,5 – оптимальное увлажнение;
- при ГТК 1,6 и более – избыточное увлажнение [19].

Объектами исследования служили: анаморфная форма гриба *Botryotinia fuckeliana* – вид *Botrytis cinerea* и сорта селекции ВНИИМК: рапса озимого – Дракон, Элвис и Лорис, горчицы сарептской – Джуна.

При проведении учетов поражения растений серой гнилью использовали разработанную нами балльную шкалу:

0 – растение здоровое;

1 балл – наличие мицелия патогена на трещинах стебля шириной до 0,3 см. Поражено до 10% стручков с наличием мицелия на их поверхности;

2 балла – наличие мицелия патогена на трещинах стебля шириной более 0,3 см. Поражено 11…40% стручков с наличием мицелия на их поверхности;

3 балла – наличие мицелия патогена на трещинах стебля шириной более 0,3 см, переламывание пораженного стебля в месте трещины. Поражено 41% стручков и более с наличием мицелия на их поверхности.

Вредоносность серой гнили (снижение продуктивности растения, или потери урожая с растения) изучали на растениях, пораженных болезнью в разной степени: в фазе зеленого стручка этикетировали растения только с симптомами поражения серой гнилью (по 5 растений на каждый балл поражения) и растения без признаков поражения болезнями (5 растений). После созревания проводили отбор этих растений, обмолачивали их вручную, учитывали урожай семян с одного растения, количество стручков на одном растении, рассчитывали среднюю массу семян с одного стручка каждого растения. Потери урожая семян с одного растения (вредоносность болезней) вычисляли по формуле М.К. Хохрякова и др. [20]:

Вредоносность серой гнили рассчитывали по степени поражения растений озимых рапса и горчицы сарептской, так как необходимо было выяснить, существует ли разница в величине вредоносности серой гнили при поражении растений на 1 балл, 2 балла и 3 балла. Вредоносность болезни подразделяли на:

- низкую – до 15,0%;
- среднюю – 15,1…30,0%;
- высокую – 30,1% и выше.

Выделение изолятов патогена в чистую культуру из пораженных болезнью тканей растений проводили в лабораторных условиях по общепринятым методикам [21]. Выделенные изоляты патогена идентифицировали по определителю Н. М. Пидопличко [22].

Статистическую обработку данных проводили с использованием метода простой корреляции и t-критерия Стьюдента. Корреляцию использовали при определении связи между поражением растений болезнью и другими признаками. Расчеты t-критерия Стьюдента проводили для сравнения средних многолетних данных массы семян в стручке.

Результаты и обсуждение. Погодные условия, складывающиеся во 2 декаде июня, благоприятствовали развитию *B. cinerea* в посевах озимых рапса и горчицы сарептской в 2011, 2014, 2017, 2020 годы, когда гидротермический коэффициент превысил 1,0 (1,1…2,7), что характеризует увлажнение среды как оптимальное и избыточное. Также в эти периоды отмечена высокая относительная влажность воздуха (63…77%). Вследствие этого, внутри посевов озимых рапса и горчицы

сарептской в течение длительного времени влажность воздуха превышала значения относительной влажности воздуха в окружающей среде. В остальные годы ГТК в этот период варьировал от 0,01 в 2012 годы до 1,0 в 2015 годы, что свидетельствует о недостаточном увлажнении среды, в сочетании с невысокой относительной влажностью воздуха (50…62%) (рис. 1).

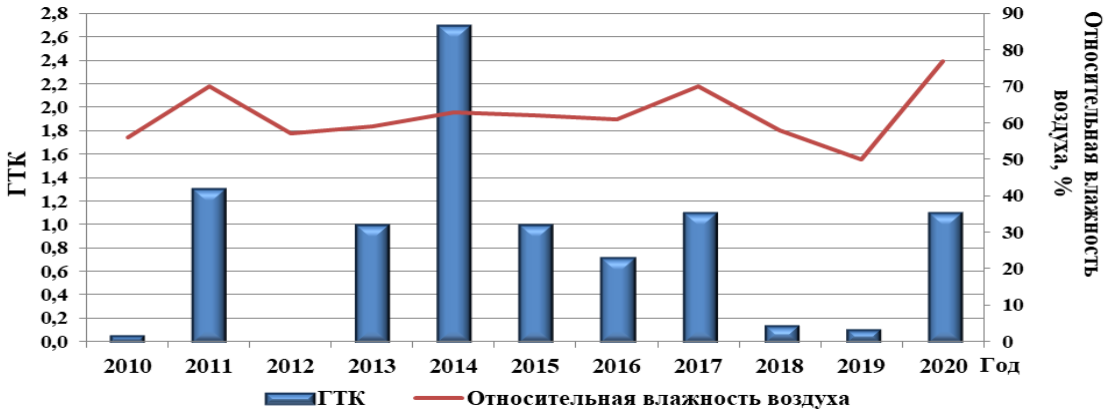


Рис. 1 – Относительная влажность воздуха и ГТК за 2 декаду июня

Распространению и развитию возбудителя серой гнили на озимых рапсе и горчице сарептской способствовали многочисленные трещины стеблей, возникавшие в 2011, 2014, 2017 и 2020 годы при неоднократной смене дневных положительных и ночных отрицательных температур во 2 и 3 декадах марта. Вместе с тем, более интенсивное развитие серой гнили на изучаемых культурах отмечали после ливневых дождей в течение нескольких суток подряд в фазе зеленого стручка (до 3…4 суток).

Первые симптомы серой гнили в посевах изучаемых озимых культур выявлены в фазе зеленого стручка. Признаками проявления болезни на растениях являлся густой темно-серый налет, состоящий из гиф и разветвленных конидиеносцев с конидиями *B. cinerea* (анаморфной стадии), покрывающий трещины на стеблях и некрозы на нижних и средних листьях. На поверхности стручков, в местах повреждений отмечалось инфекционное начало патогена, в дальнейшем мицелий гриба проникал внутрь стручков, оказывая негативное влияние на качество семян культур. Поверхностные ткани стручков в местах поражения обесцвечивались (рис. 2).



Рис. 2 – Некроз с конидиеносцами и конидиями *Botrytis cinerea* Pers. на поверхности стручка горчицы сарептской озимой (ориг.)

Пораженные серой гнилью растения озимых рапса и горчицы сарептской выявлены с низкой распространенностью (5…10%). Степень поражения болезнью растений составляла 1…3 балла с преобладанием 1 балла, то есть отмечено наличие мицелия патогена на трещинах стебля шириной до 0,3 см с поражением до 10% стручков с наличием мицелия на их поверхности.

Влияние серой гнили на продуктивность растений при степени поражения 1…2 балла больше зависело от количества пораженных болезнью стручков, а при степени 3 балла – от инфекции патогена, находящейся в трещинах стебля. Средняя масса семян со стручка озимых рапса и горчицы сарептской уменьшалась по сравнению со здоровым растением в зависимости от степени поражения растения, при 2 и 3 баллах отмечено значительное снижение массы семян: в 1,3…3,1 и 1,4…2,7 раза соответственно (табл. 1).

Таблица 1 – Средняя масса семян в стручке здорового и пораженного серой гнилью растения озимого рапса и горчицы сарептской, среднее за 2011, 2014, 2017, 2020 годы

Степень поражения растения, балл	Рапс озимый		Горчица сарептская озимая	
	средняя масса семян в стручке с растения, г	t-критерий факт.*	средняя масса семян в стручке с растения, г	t-критерий факт.*
0 (здоровое)	0,088	-	0,063	-
1	0,079	5,0	0,057	3,5
2	0,068	10,0	0,046	9,4
3	0,028	21,5	0,023	22,2
*$t_{теор.}$ = 3,2 на уровне значимости 0,005, число степеней свободы n-2=18.				

Существенность полученных данных подтверждается значениями фактического t-критерия: при всех степенях поражения растений озимых рапса и горчицы сарептской серой гнилью его показатели превышали теоретический t-критерий на уровне значимости 99,5% (0,005): при степени поражения 1 балл – в 1,1…1,6 раза (3,5…5,0), 2 балла – в 2 раза (9,4…0,0), 3 балла – в 4 раза (21,5…22,2).

При изучении связи между средней массой семян в стручке и поражением растений озимых рапса и горчицы сарептской болезнью использовали метод простой корреляции: рассчитаны коэффициенты простой корреляции, которые составили -0,93 и -0,96 соответственно; что свидетельствует о сильной, прямолинейной, обратной (отрицательной) корреляционной зависимости между этими показателями (табл. 2).

Таблица 2 – Коэффициент корреляции между поражением растений серой гнилью и средней массой семян в стручке рапса озимого (r_1) и горчицы сарептской (r_2), (n = 20)

Показатель	Средняя масса семян в стручке рапса озимого (r_1)	Средняя масса семян в стручке горчицы сарептской озимой (r_2)
Поражение растений серой гнилью	-0,93	-0,96

Для оценки надежности рассчитанных коэффициентов простой корреляции определяли их ошибку s, которая составила для r_1 и r_2 0,03 и 0,02 соответственно, то есть отклонение от выборочного среднего значения незначительное (табл. 3).

Таблица 3 – Зависимость между поражением растений серой гнилью и средней массой семян в стручке озимых рапса (r_1) и горчицы сарептской (r_2), (n = 20)

Показатель	Стандартная ошибка s*	Точность оценки σ для генерального коэффициента корреляции	Коэффициент детерминации d
r_1	0,03	$\pm$0,10	0,86
r_2	0,02	$\pm$0,06	0,92
*число степеней свободы n-2=18.			

Кроме этого, с целью подтверждения достоверности найденных коэффициентов простой линейной корреляции (выборочных коэффициентов) определяли доверительный интервал для генерального линейного коэффициента корреляции ρ ($r - \sigma < \rho < r + \sigma$), который может быть больше или меньше выборочных коэффициентов корреляции. Для этого рассчитана точность оценки σ, которая составила для рапса озимого +0,10 и для горчицы сарептской озимой +0,06. Расчеты показали, что доверительный интервал для генерального линейного коэффициента корреляции с вероятностью 0,95 на рапсе составил $-1 < \rho < -0,83$; а на горчице сарептской $-1 < \rho < -0,90$.

Следовательно, установленные доверительные интервалы содержат значение генерального коэффициента корреляции ρ (генеральный коэффициент входит в эти интервалы), и можно утверждать, что поражение озимых рапса и горчицы сарептской серой гнилью будет существенно снижать продуктивность растений не только в условиях степной зоны Западного Предкавказья, но и в других регионах возделывания этих культур.

В ходе исследований рассчитаны коэффициенты детерминации d, показатели которых свидетельствуют о том, что доля вариации снижения средней массы семян в стручке озимых рапса и горчицы сарептской на 86 и 92% соответственно обусловлена степенью поражения растений серой гнилью.

В процентном соотношении потери урожая с растения озимых рапса и горчицы сарептской от болезни в среднем по всем баллам составило 33,3 и 32,1%, что говорит о значительной вредоносности серой гнили для культур (табл. 4).

При степени поражения растений 1 балл вредоносность серой гнили на изучаемых культурах была низкой (8,4…10,0%), 2 балла – средней (22,6…25,4%), а при поражении на максимальный 3 балл – высокой (62,4…67,2%).

Таблица 4 – Вредоносность серой гнили при поражении растений озимых рапса и горчицы сарептской, среднее за 2011, 2014, 2017, 2020 годы

Культура	Вредоносность болезни*, % при степени поражения растения, балл			
	1	2	3	Среднее
Рапс озимый	10,0	22,6	67,2	33,3
Горчица сарептская озимая	8,4	25,4	62,4	32,1
*вредоносность: низкая – до 15,0%; средняя – 15,1…30,0%; высокая – 30,1% и выше.				

Выводы. В условиях степной зоны Западного Предкавказья погодные условия, складывающиеся во 2 декаде июня, благоприятствовали развитию *Botrytis cinerea* в посевах озимых рапса и горчицы сарептской в 2011, 2014, 2017, 2020 годы (ГТК = 1,1…2,7 в сочетании с относительной влажностью воздуха 63…77%). Интенсивному развитию возбудителя болезни на растениях способствовали многочисленные трещины стеблей.

Средняя масса семян со стручка озимых рапса и горчицы сарептской уменьшалась, по сравнению со здоровым растением, в зависимости от степени поражения растения. Величина фактического t-критерия при всех степенях поражения растений озимых рапса и горчицы сарептской серой гнилью значительно превышали теоретический t-критерий на уровне значимости 99,5%: при степени поражения 1 балл – в 1,1…1,6 раза (3,5…5,0), 2 балла – в 2 раза (9,4…10,0), 3 балла – в 4 раза (21,5…22,2).

Корреляционная зависимость между средней массой семян в стручке и поражением растений озимых рапса и горчицы сарептской болезнью – сильная прямолинейная обратная (отрицательная), коэффициенты простой корреляции составили соответственно -0,93 и -0,96; коэффициенты детерминации – 0,86 и 0,92.

В относительном выражении вредоносность серой гнили на озимых рапсе и горчице сарептской в среднем по всем баллам поражения составила 33,3 и 32,1% соответственно.

Литература

1. Sajeeb A., Rajendrakumar P. K. Comparative evaluation of lubricant properties of biodegradable blend of coconut and mustard oil // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 240. 118255 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619331257 (дата обращения: 09.09.2025). doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118255.

2. The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy. Joining environmental and economic assessment / M. B. Forleo, N. Palmieri, A. Suardi, et al. // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. P. 3138–3153. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.094.

3. Прахова Т. Я., Прахов В. А. Оценка продуктивности сортов масличных культур в условиях Среднего Поволжья // Вестник Рязанского ГАУ имени П. А. Костычева. 2019. № 2 (42). С. 36–41.

4. The Rapeseed Potential in Poland and Germany in the Context of Production, Legislation, and Intellectual Property Rights / E. Woźniak, E. Waszkowska, T. Zimny, et al. // Front Plant Science. 2019. Vol. 10. 1423 URL: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.01423/full (дата обращения: 05.09.2025). doi: 10.3389/fpls.2019.01423.

5. Brassicaceae Mustards: Traditional and Agronomic Uses in Australia and New Zealand / M. Rahman, A. Khatun, L. Liu, et al. // Molecules. 2018. Vol. 23. No. 1. P. 231. URL: https://www.mdpi.com/1420-3049/23/1/231 (дата обращения: 03.09.2025). doi: 10.3390/molecules23010231.

6. Szőllősi R. Chapter 25 – Indian Mustard (Brassica juncea L.) Seeds in Health // Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention (Second Edition). 2020. Vol. 25. P. 357–364. doi: 10.1016/B978-0-12-818553-7.00025-5.

7. Valorization of calcium phosphite waste as phosphorus fertilizer: Effects on green manure productivity and soil properties / M. Fontana, L. Bragazza, T. Guillaume, et al. // Journal of Environ Manage. 2021. Vol. 285 112061 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721001237?via%3Dihub (дата обращения: 06.09.2025). doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112061.

8. Overexpression of Brassica napus NPR1 enhances resistance to Sclerotinia sclerotiorum in oilseed rape / Z. Wang, W.-H. Zhang, L.-Yu. Ma, et al. // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2020. Vol. 110. 101460 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0885576519303303?via%3Dihub (дата обращения: 02.09.2025). doi: 10.1016/j.pmpp.2020.101460.

9. Non-crop sources of Rapeseed Phyllody phytoplasma ('Candidatus Phytoplasma asteris': 16SrI-B and 16SrI-(B/L)L), and closely related strains / A. Zwolińska, K. Krawczyk, N. Borodynko-Filas, et al. // Crop Protection. 2019. Vol. 119. P. 59–68. doi: 10.1016/j.cropro.2018.11.015.

10. Gupta S., Didwania N., Singh D. Biological control of mustard blight caused by Alternaria brassicae using plant growth promoting bacteria // Current Plant Biology. 2020. Vol. 23. 100166 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214662820300475?via%3Dihub (дата обращения: 07.09.2025). doi: 10.1016/j.cpb.2020.100166.

11. Вредные организмы в посевах рапса и меры борьбы с ними / В. М. Лукомец, Н. М. Тишков, С. А. Семеренко и др. Краснодар. 2020. 215 с.

12. Botrytis cinerea causes flower gray mold in Gastrodia elata in China / J. Li, M. Zhang, Z. Yang, et al. // Crop Protection. 2022. Vol. 155. 105923 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219422000199?via%3Dihub (дата обращения: 05.09.2025). doi: 10.1016/j.cropro.2022.105923.

13. Алексеева К. Л., Сметанина Л. Г. Серая гниль томата защищенного грунта // Защита и карантин растений. 2015. № 12. С. 38–39.

14. Antifungal activity of Bacillus mojavensis D50 against Botrytis cinerea causing postharvest gray mold of tomato / L. Zheng, X. Gu, Y. Xiao, et al. // Scientia Horticulturae. 2023. Vol. 312. 11184

URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423823000171?via%3Dihub (дата обращения: 07.09.2025). doi: 10.1016/j.scienta.2023.111841.

15. Nanoformulations containing rosemary oil for gray mold control in strawberries / E. G. Ramos, A. G. Queiroz, M. B. R. Veleirinho, et al. // Scientia Horticulturae. 2024. Vol. 338. 113678 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423824008318?via%3Dihub (дата обращения: 04.09.2025). doi: 10.1016/j.scienta.2024.113678.

16. Methionine represses gray mold of tomato by keeping nitric oxide at an appropriate level via ethylene synthesis and signal transduction / Q. Zhang, S. Zhang, B. Wu, et al. // Food Chemistry. 2024. Vol. 461. 140942 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814624025925?via%3Dihub (дата обращения: 25.08.2025). doi: 10.1016/j.foodchem.2024.140942.

17. Станчук А. Э. Распространенность и вредоносность гнилей корнеплодов моркови столовой в условиях Беларуси. Овощеводство. 2019. Т. 27. С. 232–239.

18. Nellist C. F. Disease resistance in polyploid strawberry. In: T. Hytönen, J. Graham, R. Harrison (eds). The Genomes of Rosaceous Berries and Their Wild Relatives. Compendium of Plant Genomes. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 2018. P.79–94. doi: 10.1007/978-3-319-76020-9_7.

19. Селянинов Г. Т. К методике сельскохозяйственной климатографии // Тр. с.-х. метеорологии. 1930. № 21 (2). С. 14–15.

20. Определитель болезней сельскохозяйственных культур / М. К. Хохряков, В. И. Потлайчук, А. Я. Семенов и др. Л.: Колос, 1984. 304 с.

21. Методы фитопатологии / З. Кирай, З. Клемент, Ф. Шоймоши и др. М.: Колос, 1974. С. 178–191.

22. Пидопличко Н. М. Грибы-паразиты культурных растений. Киев: Наукова думка, 1977. Т. 1. С. 151–153.

Сведения об авторе:

Сердюк Оксана Анатольевна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела селекции рапса и горчицы, e-mail: oserduk@mail.ru

Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В.С. Пустовойта», Краснодар, Россия.

INFLUENCE OF GRAY MOLD ON PRODUCTIVITY OF WINTER RAPE AND WINTER MUSTARD

O. A. Serdyuk

Abstract. Gray mold is a harmful disease affecting winter rape and winter mustard. The objective of the study was to determine the impact of gray mold infestation of winter rape and mustard on reduced plant productivity on leached chernozem soil in the steppe zone of the Western Ciscaucasia. The study was conducted from 2010 to 2020. The study subjects were the fungus *Botrytis cinerea Pers.* and winter rapeseed varieties Dragon, Elvis and Loris, and Dzhuna mustard variety. The severity of gray mold (reduced plant productivity) was calculated based on the degree of infestation. Statistical data processing was performed using the simple correlation method and Styudent's t-test. Meteorological conditions favored for *B. cinerea* development in crops in the 2nd ten-day period of June in 2011, 2014, 2017 and 2020 at HTC = 1.1...2.7 in combination with high relative air humidity (63...77%). The average seed weight per pod decreased depending on the degree of plant damage by 1.1...3.1 times. The correlation between the average seed weight per pod and the damage score of winter rape and mustard by Sarepta disease is strong, linear, and inverse (negative). The simple correlation coefficients were -0.93 and -0.96, respectively, and the determination coefficients were 0.86 and 0.92. In relative terms, the disease's damage to winter rape and mustard averaged 33.3% and 32.1%.

Key words: winter rape (*Brassica napus L.*), winter mustard (*Brassica juncea L.*), gray mold (*Botrytis cinerea Pers.*), plant productivity, damage.

References

1. Sajeeb A, Rajendrakumar PK. Comparative evaluation of lubricant properties of biodegradable blend of coconut and mustard oil. [Internet]. Journal of Cleaner Production. 2019; Vol.240. 118255 p. [cited 2025, September 09]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619331257. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118255.

2. Forleo MB, Palmieri N, Suardi A. The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy. Joining environmental and economic assessment. Journal of Cleaner Production. 2018; Vol.172. 3138-3153 p. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.094.

3. Prakhova TYa, Prakhov VA. [Evaluation of productivity of oilseed crop varieties in the conditions of middle Volga region]. Vestnik Ryazanskogo GAU imeni P.A. Kostycheva. 2019; 2 (42). 36-41 p.

4. Wozniak E, Waszkowska E, Zimny T. The rapeseed potential in Poland and Germany in the context of production, legislation, and intellectual property rights. [Internet]. Front Plant Science. 2019; Vol.10. 1423 p. [cited 2025, September 05]. Available from: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.01423/full. doi: 10.3389/fpls.2019.01423.

5. Rahman M, Khatun A, Liu L. Brassicaceae mustards: traditional and agronomic uses in Australia and New Zealand. [Internet]. Molecules. 2018; Vol.23. No.1. 231 p. [cited 2025, September 03]. Available from: https://www.mdpi.com/1420-3049/23/1/231. doi: 10.3390/molecules23010231.

6. Szollosi R. Chapter 25 – Indian Mustard (Brassica juncea L.) seeds in health. Nuts and seeds in health and disease prevention (second edition). 2020; Vol.25. 357-364 p. doi: 10.1016/B978-0-12-818553-7.00025-5.

7. Fontana M, Bragazza L, Guillaume T. Valorization of calcium phosphite waste as phosphorus fertilizer: Effects on green manure productivity and soil properties. [Internet]. Journal of Environ Manage. 2021; Vol.285. 112061 p. [cited 2025, September 06]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721001237?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112061.

8. Wang Z, Zhang WH, Ma YuL. Overexpression of Brassica napus NPR1 enhances resistance to Sclerotinia sclerotiorum in oilseed rape. [Internet]. Physiological and Molecular Plant Pathology. 2020; Vol.110. 101460 p. [cited 2025, September 02]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0885576519303303?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.pmpp.2020.101460.

9. Zwolinska A, Krawczyk K, Borodynko-Filas N. Non-crop sources of rapeseed phyllody phytoplasma (Candidatus Phytoplasma asteris: 16SrI-B and 16SrI-(B/L)L) and closely related strains. Crop Protection. 2019; Vol.119. 59-68 p. doi: 10.1016/j.cropro.2018.11.015.

10. Gupta S, Didwania N, Singh D. Biological control of mustard blight caused by Alternaria brassicae using plant growth promoting bacteria. [Internet]. Current Plant Biology. 2020; Vol.23. 100166 p. [cited 2025, September 07]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214662820300475?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.cpb.2020.100166.

11. Lukomets VM, Tishkov NM, Semerenko SA. Vrednye organizmy v posevakh rapsa i mery borby s nimi. [Pests in rapeseed crops and measures to control them]. Krasnodar. 2020; 215 p.

12. Li J, Zhang M, Yang Z. Botrytis cinerea causes flower gray mold in Gastrodia elata in China. [Internet]. Crop Protection. 2022; Vol.155. 105923 p. [cited 2025, September 05]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219422000199?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.cropro.2022.105923.

13. Alekseeva KL, Smetanina LG. [Gray mold of tomato in protected ground]. Zashchita i karantin rasteniy. 2015; 12. 38-39 p.

14. Zheng L, Gu X, Xiao Y. Antifungal activity of Bacillus mojavensis D50 against Botrytis cinerea causing postharvest gray mold of tomato. [Internet]. Scientia Horticulturae. 2023; Vol.312. 11184 p. [cited 2025, September 07]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423823000171?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.scienta.2023.111841.

15. Ramos EG, Queiroz AG, Veleirinho MBR. Nanoformulations containing rosemary oil for gray mold control in strawberries. [Internet]. Scientia Horticulturae. 2024; Vol.338. 113678 p. [cited 2025, September 04]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423824008318?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.scienta.2024.113678.

16. Zhang Q, Zhang S, Wu B. Methionine represses gray mold of tomato by keeping nitric oxide at an appropriate level via ethylene synthesis and signal transduction. [Internet]. Food Chemistry. 2024; Vol.461. 140942 p. [cited 2025, August 25]. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814624025925?via%3Dihub. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.140942.

17. Stanchuk AE. [Prevalence and harmfulness of root rots of table carrots in Belarus]. Ovoshchevodstvo. 2019; Vol.27. 232-239 p.

18. Nellist CF. Disease resistance in polyploid strawberry. In: T. Hytönen, J. Graham, R. Harrison (eds). The genomes of rosaceous berries and their wild relatives. Compendium of plant genomes. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 2018; 79-94 p. doi: 10.1007/978-3-319-76020-9_7.

19. Selyaninov GT. [To the methodology of agricultural climatography]. Tr. s.-kh. meteorologii. 1930; 21 (2). 14-15 p.

20. Khokhryakov MK, Potlaychuk VI, Semenov AYa. Opredelitel bolezney selskokhozyaystvennykh kultur. [Identifier of agricultural crop diseases]. Leningrad: Kolos. 1984; 304 p.

21. Kiray Z, Klement Z, Shoymoshi F. Metody fitopatologii. [Methods of phytopathology]. Moscow: Kolos. 1974; 178-191 p.

22. Pidoplichko NM. Griby-parazity kulturnykh rasteniy. [Parasitic fungi of cultivated plants]. Kiev: Naukova dumka. 1977; Vol.1. 151-153 p.

Author:

Serdyuk Oksana Anatolevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher of Rapeseed and Mustard Breeding Department, e-mail: oserduk@mail.ru

Federal Research Center All-Russian Research Institute of Oilseed Crops named after V.S.Pustovoyt, Krasnodar, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-70-76
УДК 633.111.1:[631.524.7:631.576.331.2]

КАЧЕСТВО ЗЕРНА СОРТОВ ОЗИМОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ СЕЛЕКЦИИ САМАРСКОГО НИИСХ В СТЕПНОМ ЗАВОЛЖЬЕ

Е. Н. Шаболкина, Д. О. Долженко, Н. Э. Долженко, Н. В. Анисимкина

Реферат. Исследование проводили с целью оценки основных показателей качества зерна сортов озимой мягкой пшеницы в условиях Степного Заволжья и установления корреляционных связей между ними. Работу выполняли в 2022–2024 годы на чернозёме обыкновенном в Самарской области на 12 сортах озимой мягкой пшеницы, высевавшихся по чистому пару по типу конкурсного сортоиспытания. Агрометеорологические условия в 2022 году характеризовались благоприятным увлажнением, в 2023 и 2024 годы – засухой разной интенсивности. Содержание белка в зерне, объём хлеба, общая хлебопекарная оценка и особенно число падения зависели, преимущественно, от генотипа (доля влияния фактора 36,3…52,6%), а реологические свойства теста – в большей степени от условий года (35,2…52,4%). По содержанию белка в зерне и валориметрической оценке большинство изученных сортов можно отнести к категории хороший филлер. Требованиям к ценной пшенице по содержанию белка соответствовали Безенчукская 380 (13,5%) и Вьюга (13,1%), валориметрической оценке – Альтернатива, Скирда и Вьюга (58…65 е. вал.). Максимальными в опытах величинами ключевого для озимой пшеницы показателя качества «число падения» отличались сорта Эстафета, Вьюга, Интеграция (336…363 с). По комплексу показателей качества выделен новый короткостебельный сорт озимой мягкой пшеницы Вьюга. На основании результатов корреляционного анализа предложены такие критерии оценки хлебопекарных качеств мягкой пшеницы, как «стойкость теста» по фариографу Брабендера и содержание белка в зерне. Последний из них может быть информативен в годы с благоприятным гидротермическим режимом периода вегетации озимой пшеницы, когда проявляется наибольшая дифференциация сортов по содержанию белка в зерне.

Ключевые слова: пшеница мягкая озимая (*Triticum aestivum* L.), сорт, качество зерна, белок, реологические свойства, хлебопекарные свойства, число падения.

Введение. Особое место в зерновом балансе Самарской области отводится ценнейшей продовольственной культуре – озимой мягкой пшенице. Одной из основных задач при возделывании продовольственной озимой пшеницы выступает не просто получение высокого урожая, но и высококачественного зерна. Качество зерна – это совокупность параметров, зависящих от генетики сорта, погодно-климатических условий, плодородия почвы и технологий выращивания. Наиболее значимыми при оценке качества зерна пшеницы служат следующие показатели: содержание белка, разжижение теста, валориметрическая оценка, число падения. Показатели фариограммы дают возможность по валориметрической оценке вести дифференцированный отбор по качеству зерна [1, 2, 3]. Число падения, отражающее процессы скрытого прорастания зерна, – один из основных показателей качества зерна озимой пшеницы, и его взаимосвязь с другими показателями важна для наиболее полной оценки генотипов в процессе селекции [4, 5]. Низкое число падения в зерне ведет к резкому снижению технологических и хлебопекарных свойств пшеницы, вследствие высокой активности альфа-амилазы при прорастании зерна [6, 7], этот показатель положительно коррелирует со стойкостью теста по фариографу и отрицательно – с показателем разжижения теста [8].

Для установления объективного качества зерна необходимо комплексное и углубленное изучение большого количества биохимических и технологических параметров зерна, муки и теста, выяснение корреляционных связей между ними для оценки их информативности, а также применение наиболее важных показателей на ранних этапах селекционного процесса для максимального дифференцированного отбора образцов.

Цель исследований – оценить основные показатели качества зерна сортов озимой мягкой пшеницы селекции Самарского научно-исследовательского института сельского хозяйства в условиях Степного Заволжья и установить корреляционные связи между ними.

Условия, материалы и методы. На экспериментальной базе Самарского НИИСХ – филиала СамНЦ РАН изучали в течение 2022–2024 годы биохимические и технологические свойства зерна 12 сортов озимой мягкой пшеницы конкурсного сортоиспытания, в том числе 11 сортов селекции Самарского НИИСХ и широко распространённого сорта-стандарта Скипетр. Опыт размещали в специализированном селекционном севообороте, предшественник – чистый пар. Площадь делянки 20 м^2, повторность четырёхкратная. Обработка чистого пара – ресурсосберегающая на глубину 6…8 см культиватором ОП-4,2. Весной вносили аммиачную селитру в дозе N_{35} прикорневым способом сеялкой СЗП-3,6. В фазе начала выхода в трубку посевы обрабатывали гербицидами для уничтожения сорной растительности. Почва опытного участка – чернозём обыкновенный с содержанием в слое 0…30 см гумуса в среднем 3,8 % (ГОСТ 2613-91), гидролизуемого азота – 61,4 мг/кг (ГОСТ 26951-86), подвижного фосфора и калия – соответственно 304 мг/кг и 192 мг/кг (ГОСТ 26204-91).

Оценку качества зерна проводили в соответствии с методиками национальных стандартов Российской Федерации и методов

ИСО: содержание белка в зерне – по ГОСТ 10846-91; физические характеристики теста – на фаринографе по ГОСТ Р 51404-99 (ИСО 5530-1-97); пробные лабораторные выпечки – безопарным методом с интенсивным замесом теста из пшеничной муки по методике государственного сортоиспытания с определением объёмного выхода хлеба и общей хлебопекарной оценки, включающей показатели внешнего вида, пористость, структуру, цвет и вкус мякиша [9]; показатель «число падения» в зерне – по Хагбергу-Пертену (ГОСТ 30498-97). Статистическая обработка экспериментальных данных проведена методами дисперсионного, вариационного и корреляционного анализов по Б. А. Доспехову [10].

Метеорологические условия осеннего периода вегетации за годы исследований были благоприятными и позволяли получить дружные всходы, нормально раскустившиеся посевы (3…5 побегов) с хорошо развитой вторичной корневой системой. Перезимовка в 2021/2022 и 2023/2024 сельскохозяйственном годах была хорошей, в 2022/2023 году – удовлетворительной.

Наиболее благоприятным для роста и развития озимой мягкой пшеницы был 2021/2022 сельскохозяйственный год. Весенне-летний период вегетации протекал при пониженном температурном режиме и количестве осадков на 49% выше нормы. ГТК периодов «возобновление весенней вегетации (ВВВ) – колошение» и «колошение – восковая спелость» составил 2,16 и 0,85 соответственно.

В 2022/2023 сельскохозяйственном году ВВВ было отмечено на 16 дней раньше среднемноголетнего значения. Условия весенне-летнего периода вегетации были засушливыми. ГТК за период «ВВВ – колошение» составил 0,52, в 60% дней периода отмечали суховеи. За время формирования и налива зерна ГТК составил 0,67, доля дней с суховейными явлениями за период – 27%.

В 2023/2024 годы запасы продуктивной влаги в почве ко времени ВВВ озимой пшеницы составили 179 мм (выше среднемноголетней нормы на 33%), температурный режим апреля был повышенным (на 5,8°С), что вызвало интенсивное развитие озимых в период «ВВВ – колошение. В период формирования и налива зерна гидротермический режим ужесточился. Температура воздуха в июне была выше среднемноголетней на 2,3°С, в первой декаде июля – на 3,9°С выше, дневные максимумы часто превышали 30°С, что негативно повлияло на завязываемость и налив зерна. Осадков во время завязывания и первоначального формирования зерновки не было, а в дальнейшем 82% от выпавших дождей носили ливневый характер. ГТК за период «колошение – восковая спелость» составил 0,63, что характеризует условия периода как засушливые.

Результаты и обсуждение. В засушливых условиях Степного Заволжья влагообеспеченность посевов, наследственные возможности сорта оказывают существенное влияние на качество озимой пшеницы. Содержание белка в зерне составило в среднем по опыту 12,4%, изменяясь в зависимости как от условий выращивания – от 11,9 до 12,5% (табл. 1), так и от генотипических особенностей – от 11,8 до 13,5% (табл. 2). Достоверность вклада изучаемых факторов в дисперсию признака была статистически доказана на 5%-ном уровне значимости (см. табл. 2), причём наибольший вклад отмечен для факторов «генотип» и «взаимодействие «генотип × среда». Максимальное количество белка в зерне было сформировано в 2023 и 2024 годы, при незначительном межсортовом варьировании (коэффициент вариации Cv составил 3,3…3,9%). Высокая температура воздуха, дефицит влаги во время налива и формирования зерна укоротили этот период на 5…6 дней, способствуя наибольшему формированию массовой доли белковых веществ в зерне. В 2022 году в условиях, наиболее благоприятных для роста и развития растений, коэффициент вариации был значительно выше и составил 9,0% (при среднем содержании белка по сортам 11,9%), затраты питательных веществ пошли на формирование вегетативной массы и высокой продуктивности.

В среднем за три года выделены сорта озимой пшеницы, превысившие стандарт Скипетр по массовой доле белка в зерне – Безенчукская 380 (13,5%), Вьюга (13,1%), Альтернатива (12,9%). Сорт озимой пшеницы Безенчукская 380 формировал зерно с высокой массовой долей белка, 13,4…13,6%, во все годы исследований, независимо от метеорологических условий вегетационного периода. Практически все изучаемые сорта озимой пшеницы по содержанию белка в зерне за время испытаний относились к хорошим филлерам, за исключением двух сортов: Безенчукская 380 и Вьюга, которые соответствовали ценной по качеству пшенице.

Показатель физических свойств теста, определяемый на фаринографе Брабендера, – стойкость или сопротивляемость (сумма времени образования и устойчивости теста к замесу) – наибольшим за годы исследования был у сорта Альтернатива (7,3 мин).

В 2023 году отмечали лучшие реологические свойства теста у изучаемых сортов озимой пшеницы за годы исследований, и сорт Альтернатива имел наибольшее значение стойкости 12,5 мин при средней величине признака за этот год 7 мин.

Разжижение теста по фаринографу в среднем за годы исследований в опыте колебалось в пределах 83…140 е.ф., наименьшее значение этого показателя отмечено у сортов Альтернатива, Интеграция, Вертикаль, Вьюга (83…87 е.ф.). В 2023 году практически все изучаемые сорта по разжижению теста входили в категорию ценной по качеству пшеницы (80 е.ф.), при среднем значении признака за

этот год 77 е.ф. Значения коэффициентов вариации показывают, что стойкость (Cv = 23,2…35,1%) и разжижение теста (Cv = 23,2…50,2%) относятся к сильно варьирующим признакам, и изменчивость признаков обусловлена условиями произрастания.

Обобщающим показателем реологических свойств теста выступает валориметрическая оценка (площадь фаринограммы). Этот показатель в среднем за годы исследований колебался от 45 до 65 е.вал., то есть в диапазоне, соответствующем классификационной норме от хорошего филлера до пшеницы, наиболее ценной по качеству, и характеризовался средней вариабельностью (Cv = 12,9…17,5%).

Таблица 1 – Признаки качества зерна в среднем по 12 сортам озимой мягкой пшеницы и генотипические коэффициенты вариации

Признак	Значение признака				$НСР_{05}$		Коэффициент вариации, %			
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	средние	для частных средних	для фактора «год»	2022 г.	2023 г.	2024 г.	по средним за 3 года
Содержание белка, %	11,9	12,7	12,5	12,4	0,90	0,26	9,0	3,9	3,3	4,3
Стойкость теста, мин	3,5	7,0	4,0	4,8	2,75	0,79	35,0	35,1	23,2	22,9
Разжижение, е.ф.	102	77	144	108	56,4	16,3	28,1	50,2	23,2	21,8
Валориметрическое число, е.в.	48	66	47	54	10,5	3,0	17,5	13,5	12,9	10,1
Объём хлеба, мл	563	638	668	623	145,4	42,0	17,7	11,5	19,9	13,1
Общая оценка хлеба, балл	4,1	4,4	4,2	4,2	0,47	0,13	10,7	4,5	7,8	6,0
Число падения, с	273	326	250	283	88,3	25,5	23,2	17,6	38,0	22,3

Таблица 2 – Биохимические и технологические показатели качества зерна озимой мягкой пшеницы и доля факторов изменчивости в их формировании (2022–2024 годы)

Сорт	Содержание белка, %	Фариограф			Объём хлеба, мл	Общая оценка хлеба, балл	Число падения, с
		стойкость теста, мин	разжижение теста, е.ф.	валориметрическое число, е.в.			
Скипетр (стандарт)	12,2	4,5	133	51	535	4,0	307
Безенчукская 380	13,5	3,8	93	52	743	4,4	311
Альтернатива	12,9	7,3	83	65	700	4,4	307
Малахит	12,5	4,7	111	53	583	4,2	264
Светоч	12,4	4,8	140	50	670	4,4	176
Базис	11,8	3,3	120	45	620	4,2	209
Скирда	12,2	5,8	97	58	633	4,5	188
Бирюза	12,1	5,5	107	57	677	4,5	325
Вьюга	13,1	5,5	87	58	713	4,4	348
Эстафета	12,1	4,5	150	49	572	4,1	363
Вертикаль	11,9	3,5	87	50	553	3,9	264
Интеграция	11,8	4,7	83	56	472	3,8	336
$НСР_{05}$	0,5	1,6	32	6	84	0,3	51
Доля влияния, *%:*							
Фактор «сорт»	36,4	18,8	22,9	18,3	42,0	41,1	52,6
Фактор «год»	19,2	41,6	35,2	52,4	13,4	8,5	14,8
Взаимодействие	30,6	24,2	24,4	20,3	26,9	31,7	19,0
Остаток	13,8	15,4	17,5	9,0	17,7	18,7	13,6

Известно, что валориметрическая оценка имеет высокий коэффициент наследуемости 0,70…0,80 [2] и даёт возможность провести отбор по качеству зерна на сильные, ценные и слабые сорта. Лучшие в опыте показатели отмечены у сортов озимой пшеницы: Альтернатива (65 е.вал.), Скирда (58 е.вал.), Вьюга (58 е.вал.). В 2023 году по валориметрической оценке сорта Альтернатива (83 е.вал.), Скирда (77 е.вал.), Светоч (72 е.вал.) относились к категории сильной пшеницы.

Объёмный выход хлеба озимой мягкой пшеницы при проведении пробной

лабораторной выпечки по методике Госкомиссии (472…743 мл) не соответствовал реологическим свойствам теста, определяемым на фаринографе Брабендера: практика показывает, что между этими результатами не всегда прослеживаются чёткие корреляции. Применяемые методы выпечки в некоторых случаях не позволяют раскрыть потенциальные возможности сортов, поэтому необходимо использовать методы, различающиеся рецептурой (использованием новых улучшителей), а также ходом технологического процесса с применением дифференцированного воздействия на тесто [11, 12].

Тем не менее, следует отметить, что сорта Безенчукская 380 и Вьюга отличались самыми высокими величинами объёмного выхода хлеба среди изученного набора сортов – 743 и 713 мл соответственно.

По общей хлебопекарной оценке сорта Вертикаль и Интеграция могут быть отнесены к хорошим филлерам (3,9 и 3,8 балла соответственно), сорт Скипетр (4,0 балла) – к пшеницам, наиболее ценным по качеству, а все остальные изучавшиеся сорта – к группе сильных пшениц (удовлетворительный улучшитель, 4,1…4,5 балла). Очевидно, что в тех случаях, когда сортообразцы имеют средние и высокие величины физических и реологических свойств теста, но в то же время низкий объём хлеба, необходимо совершенствование методов лабораторной выпечки, пригодных для действительно объективной оценки потенциальных возможностей сортов.

Изученные сорта по ключевому признаку для озимой пшеницы – числу падения – имели высокий генотипический потенциал (доля влияния фактора 52,6%) и небольшую, но в то же время достоверную фенотипическую изменчивость (доля влияния фактора 14,8%). Наибольшими в опыте значениями числа падения отличались сорта: Эстафета с варьированием по годам на уровне 336…417 с (в среднем 363 с), Вьюга – 317…370 с (в среднем 348 с), Интеграция – 307…391 с (в среднем 336 с). В годы исследований большинство сортов озимой пшеницы в различных метеорологических условиях вегетационного периода формировали зерно с максимальными величинами этого признака, превышающими норму, установленную для пшеницы первого класса (200 с), исключение составляли сорта Светоч (176 с) и Скирда (188 с). В 2023 году погодные условия в предуборочный период были тёплыми и характеризовались дефицитом осадков, что препятствовало прорастанию зерна и способствовало формированию озимой пшеницы с наибольшими величинами числа падения в зерне за период наблюдений 241…417 с (среднее по сортам – 326 с). Значительная изменчивость признака (коэффициент вариации составил Cv=38,0%) отмечена в 2024 году с жёстким гидротермическим режимом в период формирования и налива, отрицательно повлиявшим на завязываемость и налив зерна. В 2022 и 2023 годы, при агрометеорологических условиях, более благоприятных для роста и развития озимой пшеницы, изменчивость признака была значительно меньше (коэффициент вариации колебался в пределах Cv=17,6…23,2%).

Среди изученных сортов лучшим в опыте сочетанием показателей качества отличался современный интенсивный сорт Вьюга, в среднем за три года по большинству показателей удовлетворявший требованиям, предъявляемым к ценной пшенице (массовая доля белка в зерне, валориметрическое число, разжижение теста) и к сильной пшенице (общая оценка хлеба, число падения).

При изучении показателей качества зерна озимой пшеницы следует обратить внимание на преимущественный вклад генотипа в формирование таких признаков как содержание белка в зерне (доля влияния фактора 36,4%), объём хлеба (42,0%), общая хлебопекарная оценка (41,1%) и особенно число падения (52,6%). В то же время варьирование показателей реологических свойств, определяемых на фаринографе Брабендера, в большей степени зависело от фактора «год исследований» (35,2…52,4%).

Установление взаимосвязи между биохимическими и технологическими показателями зерна необходимо для объективной оценки качества озимой пшеницы с целью улучшения этих параметров и изучения факторов, влияющих на их выраженность.

Показатели фаринографа – валориметрическая оценка и стойкость теста – тесно и положительно коррелировали между собой во все годы исследования; коэффициент парной корреляции *r* между ними составил 0,97 в 2022 году, 0,94 – в 2023 году и 0,86 – в 2024 году (табл. 3). Сходная корреляция отмечена и между двумя показателями пробной выпечки, общей хлебопекарной оценкой и объёмом хлеба (r = 0,96, 0,84, 0,74 соответственно по годам).

Проявленная тенденция к положительной сопряжённости средней силы между одним из показателей фаринографа (стойкость теста) и показателями хлебопекарного качества убедительно доказана только в 2022 году для общей хлебопекарной оценки (r = 0,63) и в 2024 году для объёмного выхода хлеба (r = 0,58).

В 2022 году, наиболее благоприятном для роста и развития растений и формирования наибольшей урожайности озимой пшеницы, содержание белка положительно коррелировало со стойкостью теста (r = 0,63) и общей хлебопекарной оценкой (r = 0,65) и отрицательно – с разжижением теста (r = -0,69). Установлена отрицательная связь между разжижением теста и числом падения (r = -0,72) и положительная связь валориметрической оценки с общей хлебопекарной оценкой (r = 0,59) и числом падения (r = 0,59).

Результаты корреляционного анализа дают возможность вести отбор селекционного материала на хлебопекарные качества зерна.

Отбирать качественные образцы можно с некоторой долей вероятности по показателю фаринографа «стойкость теста». Повышенное содержание белка в зерне также может служить критерием отбора сортов и линий мягкой пшеницы с высокими хлебопекарными качествами в годы, благоприятные по гидротермическим условиям, когда проявляется максимальная дифференциация по этому признаку.

Таблица 3 – Матрица парных коэффициентов корреляции показателей качества зерна озимой пшеницы

Показатели качества	Содержание белка, %	Стойкость теста, мин	Разжижение теста, е.ф.	Валориметрическое число, е.в.	Объём хлеба, мл	Общая оценка хлеба, балл
2022 г.						
Содержание белка, %	1,00	-	-	-	-	-
Стойкость теста, мин	0,63*	1,00	-	-	-	-
Разжижение теста, е.ф	-0,69*	-0,85**	1,00	-	-	-
Валориметрическое число, е.в.	0,71*	0,97**	-0,94**	1,00	-	-
Объём хлеба, мл	0,52	0,54	-0,24	0,48	1,00	-
Общая оценка хлеба, балл	0,65*	0,63*	-0,35	0,59*	0,96**	1,00
Число падения, с	0,34	0,53	-0,72**	0,59*	0,00	-0,01
2023 г.						
Содержание белка, %	1,00	-	-	-	-	-
Стойкость теста, мин	-0,13	1,00	-	-	-	-
Разжижение теста, е.ф	0,19	0,00	1,00	-	-	-
Валориметрическое число, е.в.	-0,28	0,94**	-0,27	1,00	-	-
Объём хлеба, мл	0,49	0,41	-0,18	0,35	1,00	-
Общая оценка хлеба, балл	0,19	0,53	-0,18	0,48	0,84**	1,00
Число падения, с	0,32	-0,22	0,51	-0,40	-0,01	-0,19
2024 г.						
Содержание белка, %	1,00	-	-	-	-	-
Стойкость теста, мин	0,33	1,00	-	-	-	-
Разжижение теста, е.ф	-0,29	-0,06	1,00	-	-	-
Валориметрическое число, е.в.	0,46	0,86**	-0,52	1,00	-	-
Объём хлеба, мл	0,34	0,58**	0,16	0,35	1,00	-
Общая оценка хлеба, балл	-0,03	0,30	0,33	0,04	0,74**	1,00
Число падения, с	0,42	0,28	-0,32	0,46	-0,40	-0,37

**коэффициенты достоверно отличны от нуля на уровне значимости 5 %*
***коэффициенты достоверно отличны от нуля на уровне значимости 1 %*

Выводы. Установлен преимущественный вклад генотипа в формирование таких признаков, как содержание белка в зерне (доля влияния фактора 36,4%), объём хлеба (42,0%), общая хлебопекарная оценка (41,1%) и особенно число падения (52,6%). Варьирование показателей реологических свойств, определяемых на фариографе Брабендера, в большей степени зависело от фактора «год исследований» (доля влияния 35,2…52,4%), чем от генотипа.

По числу падения все изученные генотипы озимой пшеницы, кроме сортов Светоч и Скирда, превысили норму, установленную для пшеницы первого класса (200 с). Максимальными в опыте величинами этого показателя (336…363 с) отличались сорта Эстафета, Вьюга, Интеграция.

По содержанию белка в зерне требованиям к ценной по качеству пшенице отвечали Безенчукская 380 и Вьюга (соответственно 13,5% и 13,1%), остальные сорта по этому признаку относились к хорошим филлерам. По валориметрической оценке в среднем за годы исследований были выделены сорта Альтернатива, Скирда и Вьюга (58…65 е. вал.,), которые по величине этого показателя можно отнести к ценным пшеницам, остальные образцы находились на уровне хороших филлеров.

По комплексу показателей качества выделен новый интенсивный сорт озимой мягкой пшеницы Вьюга, который в среднем за 3 года по большинству показателей удовлетворял требованиям, предъявляемым к ценной (содержание белка в зерне, валориметрическое число, разжижение теста) и сильной (общая оценка хлеба, число падения) пшенице.

Объёмный выход хлеба при проведении пробной лабораторной выпечки по методике Госкомиссии (472…743 мл) не подтвердил

оценку реологических свойств теста, определяемых на фариографе Брабендера. Поэтому необходимо совершенствовать существующие методы лабораторной выпечки, чтобы получать объективную оценку потенциальных возможностей сортов.

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о возможности отбора селекционного материала на высокие хлебопекарные качества зерна, ориентируясь на показатель фариографа «стойкость теста», а в годы с максимальной дифференциацией по белковости зерна – на высокое содержание белка.

Литература

1. Реализация генетического потенциала сортов мягкой пшеницы под влиянием условий внешней среды: современные возможности улучшения качества зерна и хлебопекарной продукции / Е. К. Хлесткина, Е. В. Журавлева, Т. А. Пшеничникова и др. // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 501–514. doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.501rus.

2. Изучение реологических и физических свойств теста сортов озимой пшеницы / Н. С. Кравченко, Д. М. Марченко, О. А. Некрасова и др. // Зерновое хозяйство России. 2021. № 6 (78). С. 45–52. doi 10.31367/2079872520217864552.

3. This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 license / S. M. Dashkevich, M. U. Utebayev, O. O. Kradetskaya, et al. // OnLine Journal of Biological Sciences. 2022. Vol. 22. No. 3. P.347–355. doi: 10.3844/ojbsci.2022.347.355.

4. Late-maturity α-amylase (LMA): exploring the underlying mechanisms and end-use quality effects in wheat / A. E. Cannon, E. J. Marston, A. M. Kiszonas, et al. // Planta. 2022. Vol. 255. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00425-021-03749-3 (дата обращения: 03.11.2025). doi: 10.1007/s00425-021-03749-3.

5. LMA or vivipary? Wheat grain can germinate precociously during grain maturation under the cool conditions used to induce late maturity alpha-amylase (LMA) / P. S. Peery, S. U. Carle, M. Wysock, et al. // Frontiers in Plant Science. 2023. Vol. 14. 1156784. URL: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1156784/full (дата обращения: 03.11.2025). doi: 10.3389/fpls.2023.1156784.

6. Крупнов В. А., Крупнова О. В. Подходы по улучшению качества зерна пшеницы: селекция на число падения // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. Т. 19, № 5. С. 604–612. doi: 10.18699/VJ15.077.

7. Биохимическая, генетическая и цифровая оценка зерна сортов озимой мягкой пшеницы с различным индексом прорастания / А. В. Федяева, С. Д. Афонникова, Д. А. Афонников и др. // Физиология растений. 2024. Т. 71. № 2. С. 205–215. doi: 10.31857/S0015330324020072.

8. Гурьева К. Б., Белецкий С. Л., Хаба Н. А. Методологические подходы к комплексной оценке качества и хлебопекарных характеристик пшеницы при хранении // Пищевая промышленность. 2021. № 5. С. 24–27. doi: 10.52653/PPI.2021.5.5.005.

9. Методика государственного сортоиспытания. Технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур. М.: Колос, 1988. 121 с.

10. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Альянс, 2014. 351 с.

11. Шаболкина Е. Н. Разработка методов оценки зерна тритикале по хлебопекарным свойствам // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2010. № 4 (28). С. 33–34.

12. Современная оценка хлебопекарных свойств российской пшеницы / Е. П. Мелешкина, С. Н. Коломиец, Н. С. Жильцова и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 1. С. 155–162. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-155-162

Сведения об авторах:

Шаболкина Елена Николаевна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технолого-аналитического сервиса, e-mail: elenashabolkina@yandex.ru

Долженко Дмитрий Олегович – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и генетики мягкой пшеницы, e-mail: ddolzhenko75@yandex.ru

Долженко Надежда Эдуардовна – младший научный сотрудник лаборатории селекции и генетики мягкой пшеницы, e-mail: bugakova1987@yandex.ru@yandex.ru

Анисимкина Наталья Владимировна - старший научный сотрудник лаборатории технолого-аналитического сервиса, e-mail: anisimkina.natalya@yandex.ru

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н. М. Тулайкова, пгт. Безенчук, Самарская обл., Россия.

GRAIN QUALITY OF WINTER COMMON WHEAT VARIETIES BREEDED BY SAMARA RESEARCH INSTITUTE IN THE STEPPE TRANS-VOLGA REGION

E. N. Shabolkina, D. O. Dolzhenko, N. E. Dolzhenko, N. V.Anisimkina

Abstract. The study was conducted to evaluate the main grain quality indicators of winter common wheat varieties in the steppe Trans-Volga region and to establish correlations between them. The work was carried out from 2022 to 2024 on ordinary chernozem soil in Samara region, using 12 winter common wheat varieties sown on complete fallow, as part of a competitive variety trial. Agrometeorological conditions in 2022 were characterized by favorable moisture, while drought of varying intensity was observed in 2023 and 2024. The protein content in the grain, the volume of bread, the overall baking score and especially the falling number depended mainly on the genotype (share of the factor influence was 36.3...52.6%), while the rheological properties of the dough depended to a greater extent on the annual conditions (35.2...52.4%). Based on the protein content in the grain and the valorimetric value, most of the studied varieties can be classified as good fillers. Bezenchukskaya 380 (13.5%) and Vyuga (13.1%) met the requirements for valuable wheat in terms of protein content, while Alternativa, Skirda and Vyuga (58...65 unit of valorimeter) met the requirements. The maximum values of the key quality indicator for winter wheat, the “falling number” were observed in varities: Estafeta, Vyuga and Integratsiya (336–363 sec). Based on a set of quality characteristics a new short-stemmed variety of winter soft wheat - Vyuga, was distinguished. Based on the correlation analysis data, criteria for assessing the baking quality of common wheat have been proposed, including dough stability index according Brabender farinograph and grain protein content. The latter may be useful in years with favorable hydrothermal conditions during the winter wheat growing season, when the greatest differentiation in grain protein content occurs among varieties.

Key words: winter common wheat (*Triticum aestivum L.*), variety, grain quality, protein, rheological properties, baking properties, falling number.

References

1. Khlestkina EK, Zhuravleva EV, Pshenichnikova TA. [Realization of genetic potential of soft wheat varieties under the influence of environmental conditions: modern possibilities for improving quality of grain and bakery products]. Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2017; Vol.52. 3. 501-514 p. doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.501rus.

2. Kravchenko NS, Marchenko DM, Nekrasova OA. [Study of rheological and physical properties of the dough of winter wheat varieties]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2021; 6 (78). 45-52 p. doi 10.31367/2079872520217864552.

3. Dashkevich SM, Utebayev MU, Kradetskaya OO. This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 license. OnLine Journal of Biological Sciences. 2022; Vol.22. No.3. 347-355 p. doi: 10.3844/ojbsci.2022.347.355.

4. Cannon AE, Marston EJ, Kiszonas AM. Late-maturity α-amylase (LMA): exploring the underlying mechanisms and end-use quality effects in wheat. [Internet]. Planta. 2022; Vol.255. [cited 2025, November 03]. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s00425-021-03749-3. doi: 10.1007/s00425-021-03749-3.

5. Peery PS, Carle SU, Wysock M. LMA or vivipary? Wheat grain can germinate precociously during grain maturation under the cool conditions used to induce late maturity alpha-amylase (LMA). [Internet]. Frontiers in Plant Science. 2023; Vol.14. 1156784. [cited 2025, November 03]. Available from: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1156784/full. doi: 10.3389/fpls.2023.1156784.

6. Krupnov VA, Krupnova OV. [Approaches to improving the quality of wheat grain: breeding for falling number]. Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii. 2015; Vol.19. 5. 604-612 p. doi: 10.18699/VJ15.077.

7. Fedyaeva AV, Afonnikova SD, Afonnikov DA. [Biochemical, genetic and digital evaluation of grain of winter soft wheat varieties with different germination indices]. Fiziologiya rasteniy. 2024; Vol.71. 2. 205-215 p. doi: 10.31857/S0015330324020072.

8. Gureva KB, Beletskiy SL, Khaba NA. [Methodological approaches to a comprehensive quality assessment and baking characteristics of wheat during storage]. Pishchevaya promyshlennost. 2021; 5. 24-27 p. doi: 10.52653/PPI.2021.5.5.005.

9. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya. Tekhnologicheskaya otsenka zernovykh, krupyanykh i zernobobovykh kultur. [State variety testing methodology. Technological evaluation of grain, cereal and leguminous crops]. Moscow: Kolos. 1988; 121 p.

10. Dospekhov BA. Metodika polevogo opyta. [Field experiment methodology]. Moscow: Alyans. 2014; 351 p.

11. Shabolkina EN. [Development of methods of triticale wheat grain evaluation according to its bread-baking properties]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010; 4 (28). 33-34 p.

12. Meleshkina EP, Kolomiets SN, Zhiltsova NS. [Modern assessment of baking properties of Russian wheat]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. 2021; Vol.83. 1. 155-162 p. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-155-162

Authors:

Shabolkina Elena Nikolaevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher of Technology and Analytical Services Laboratory, e-mail: elenashabolkina@yandex.ru

Dolzhenko Dmitriy Olegovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher of Common Wheat Breeding and Genetics Laboratory, e-mail: ddolzhenko75@yandex.ru

Dolzhenko Nadezhda Eduardovna – junior researcher of Common Wheat Breeding and Genetics Laboratory, e-mail: bugakova1987@yandex.ru@yandex.ru

Anisimkina Natalya Vladimirovna – senior researcher, Technology and Analytical Services Laboratory, e-mail: anisimkina.natalya@yandex.ru

Samara Federal Research University Center of the Russian Academy of Sciences, Samara Research Institute of Agriculture named after N. M.Tulaykov, Bezenchuk, Samara region, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-77-84
УДК 631.363.2

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВ

Н. П. Аюгин, С. А. Яковлев, Ю. М. Исаев, И. А. Калашников

Реферат. Актуальность исследования по разработке измельчения кормов обусловлена важностью технологической операции подготовки кормов к скармливанию, которая значительно влияет на их продуктивность и здоровье, а также в целом на экономические показатели животноводства. Эффективность измельчителей кормов обусловлена двумя факторами: энергетическими затратами на измельчение, а также соответствием измельченного корма зоотехническим требованиям. В настоящем исследовании рассматриваются вопросы разработки измельчителя кормов, в основе которого заложены принципы энергосбережения не только за счет оптимизации конструктивных и режимных параметров измельчающего аппарата, но и создания для измельчителя системы «старт-стоп», позволяющей минимизировать работу измельчителя на холостом ходу при циклической и неравномерной подаче измельчаемого корма в загрузочный бункер. Это позволяет снизить нерациональное использование энергоресурсов при измельчении кормов в соответствии с зоотехническими требованиями. Целью работы является снижение энергоемкости измельчения корнеплодов за счет разработки измельчителя кормов, обоснования его конструктивно-режимных параметров и разработки системы «старт-стоп». В конструкции измельчителя предлагается использование плоских ножей в верхнем ярусе и гребенчатых ножей в нижнем, а также гребенчатых противорезов с расстоянием между гребнями 80 мм и сетчатых рамок с ячейкой 25 мм. Удельная энергоемкость измельчения разработанного измельчителя кормов при измельчении моркови составляет 0,23 кВт·ч/т, пропускная способность 2,8 т/ч, доля выхода фракции от 10 до 15 мм - 43,5%. Полученные результаты производственных испытаний, проведенных на базе животноводческого комплекса ООО «Агро-Н» Новоспасского района Ульяновской области, позволили подтвердить результаты лабораторных исследований и рекомендовать разработанный измельчитель кормов для сельскохозяйственных предприятий, занимающихся выращиванием крупного рогатого скота.

Ключевые слова: измельчитель, корм, удельная энергоемкость измельчения, фракционный состав, пропускная способность, морковь, «старт-стоп».

Введение. Измельчение корнеплодов перед скармливанием животным является важной технологической операцией подготовки кормов к скармливанию, которая значительно влияет на их продуктивность и здоровье, а также в целом на экономические показатели животноводства [1].

Неизмельченные корнеплоды могут застрять в пищеводе животных, что приводит к блокировке пищевода и может вызвать серьезные проблемы с пищеварением и дыханием. Это, при несвоевременном оказании ветеринарной помощи животному, часто приводит к его летальному исходу.

Измельчение кормов значительно влияет на продуктивность животных из-за повышения усвояемости питательных веществ и ускорения переваривания за счет увеличения площади поверхности измельченных частиц корма и сокращения времени пережёвывания [2]. Мелкие частицы корма имеют большую площадь поверхности, что облегчает доступ пищеварительных ферментов к ним. Это позволяет животным более эффективно усваивать такие важные нутриенты, как белки, углеводы и витамины.

По данным некоторых исследований [3, 4] оптимальный размер частиц корма увеличивает коэффициент переваривания на 10…15%, что позволяет снизить расход кормов и в конечном итоге положительно влияет на экономические показатели отрасли животноводства.

Для измельчения кормов используют различные типы измельчителей, отличающиеся по конструкции и принципу разрушения кормов (резание, удар или смятие) [5, 6, 7]. С точки зрения обеспечения минимальных энергозатрат на измельчение корма целесообразным является проектирование измельчителей кормов, работающих по принципу разрушения кормов резанием [8, 9, 10].

Эффективность измельчителей кормов обусловлена двумя факторами: энергетическими затратами на разрушение растительных материалов, используемых при кормлении животных, а также соответствием измельченного продукта зоотехническим требованиям, предъявляемым к измельченным кормам [11, 12, 13].

Цель исследования – снижение энергоемкости измельчения корнеплодов за счет разработки измельчителя кормов и обоснования его конструктивно-режимных параметров и разработки системы «старт-стоп».

Условия, материалы и методы. На кафедре «Технология производства и ремонт машин» ФГБОУ ВО Ульяновского ГАУ был разработан измельчитель кормов (рис. 1), в работе которого были заложены принципы энергосбережения, как за счет оптимизации конструктивных параметров ножей (толщина ножа, угол заточки, угол скольжения, острота режущей кромки), так и режимных параметров работы измельчителя (частота вращения вала измельчителя, реализация принципа работы «старт-стоп»).

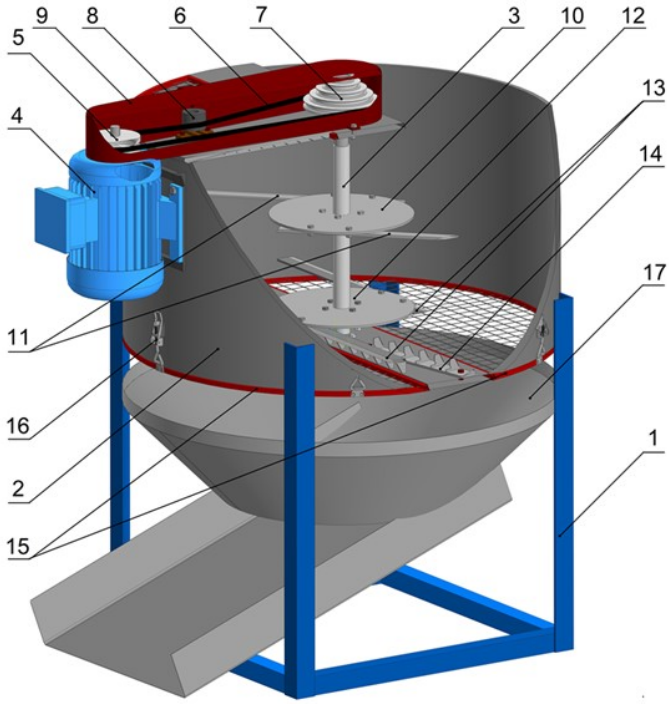


Рис. 1 – 3D модель измельчителя кормов с местным сечением: 1 – рама, 2 – корпус, 3 – вал, 4 – электродвигатель, 5 – шкив электродвигателя, 6 – ремень, 7 – шкив вала, 8 – натяжной ролик, 9 – кожух, 10 – верхний диск, 11 – плоские ножи, 12 – нижний диск, 13 - сменные гребенчатые ножи, 14 – гребенчатые противорезы, 15 – сменные сетчатые рамки, 16 – фиксаторы, 17 – выгрузной лоток

Измельчитель кормов состоит из сварной рамы, на которой размещен корпус. Внутри корпуса установлен механизм привода, в котором электродвигатель через шкив, клиновой ремень, шкив вала и натяжной ролик, закрытые сверху кожухом, вращает находящийся на подшипниках вал.

На вале размещены верхний диск, на котором закреплены плоские ножи, и нижний диск, на котором закреплены сменные гребенчатые ножи с различным расстоянием между сегментами гребенок. Плоские и гребенчатые ножи установлены на дисках со смещением относительно оси вращения, что обеспечивает создание оптимального угла скольжения ножей [14].

Под гребенчатыми ножами установлены сменные гребенчатые противорезы с различным расстоянием между сегментами противорезов. В нижней части корпуса находятся сменные сетчатые рамки, закрепленные на корпусе с помощью фиксаторов. Под корпусом размещен выгрузной лоток.

Измельчитель кормов работает следующим образом. Привод вала, на котором закреплены верхний и нижний диски, осуществляется за счет электродвигателя, передающего крутящий момент на вал измельчителя через клиноременную передачу.

Измельчаемый материал подается в зону резания через отверстие, выполненное в верхней части корпуса. Попадая внутрь корпуса, корма предварительно измельчаются на крупные частицы вращающимися плоскими ножами, закрепленными на верхнем диске. Измельчение на мелкие частицы осуществляется гребенчатыми сменными ножами с различным расстоянием между сегментами гребенок, закрепленными на нижнем диске. Для создания подпора при резании в нижней части корпуса закреплены противорезы с различным расстоянием между сегментами противорезов. Измельченные частицы корма за счет силы тяжести проваливаются в выгрузной лоток через сменные сетчатые рамки, закрепленные на корпусе с помощью фиксаторов.

Достоинством данной конструкции измельчителя кормов является возможность регулирования размера измельченной фракции корма за счет смены гребенчатых ножей и противорезов, имеющих различное расстояние между гребнями, а также использования сетчатых рамок с различным размером ячеек (от 10 до 50 мм) в соответствии с зоотехническими требованиями, предъявляемыми к измельченным кормам.

Диаметр корпуса измельчителя кормов составляет 900 мм, частота вращения вала может варьироваться в интервале от 159 до 955 мин$^{-1}$ (угловая скорость 16,65…100 рад/с), диаметр диска для крепления ножей составляет 300 мм, расстояние между гребенками сменных ножей и противорезов 40 мм и 80 мм, размер ячеек сетчатых рамок - 25 мм. Толщина ножей и гребенок составляет 3 мм, а угол их заточки 10 градусов (рис. 2).

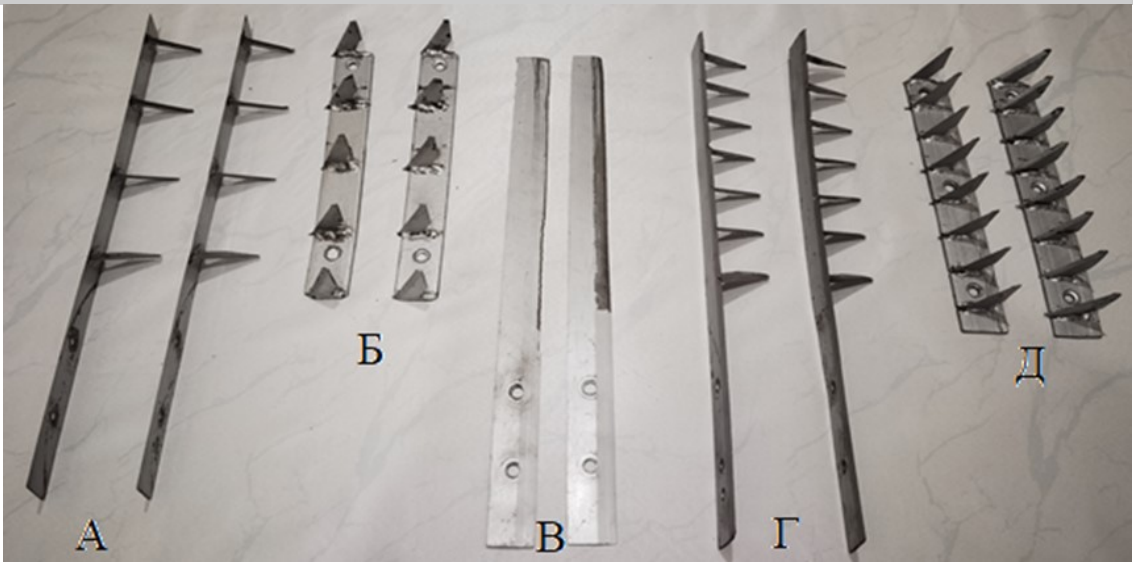


Рис. 2 - Ножи и противорезы, использованные при проведении лабораторных исследований: А – гребенчатые ножи с расстоянием между гребнями 80 мм, Б - противорезы с расстоянием между гребнями 80 мм, В – плоские ножи, Г – гребенчатые ножи с расстоянием между гребнями 40 мм, Д - противорезы с расстоянием между гребнями 40 мм

Лабораторные исследования измельчителя были проведены на базе «Умной фермы» Ульяновского ГАУ. В качестве измельчаемого продукта использовали морковь сорта «Шантанэ королевская», урожая 2025 года, средней влажностью 87,1%.

Перед измельчением были заготовлены порции моркови, массой 60 кг каждая.

Измельчение моркови осуществляли на частоте вращения вала измельчителя 159, 318, 477, 637, 796 и 955 мин$^{-1}$, что соответствует средней линейной скорости ножей 5, 10, 15, 20, 25, 30 м/с, определяемой по точке, расположенной на середине ножа.

Для определения частоты вращения вала измельчителя использовали цифровой лазерный тахометр АТ-6, учет энергопотребления измельчителя осуществляли счетчиком Меркурий 230 AR-01 R, подключенным к ПК через Bluetooth адаптер Меркурий 251, соединенного со счетчиком проводным интерфейсом CAN.

При проведении исследования использовали сменные гребенчатые ножи и противорезы с расстоянием между гребнями 40 мм и 80 мм, сетчатые рамки с размером ячеек равным 25 мм.

Количество повторности проведения опытов приняли равное трем. После измельчения порции корма определяли фракционный состав измельченного корма.

Фракционный состав измельченного корма определяли методом просеивания через набор сит с размерами ячеек 10, 15 и 20 мм. Для этого порцию измельченного корма массой 20 кг, прошедшего через сетчатые рамки измельчителя, просеивали сначала через сита с вышеуказанными размерами ячеек, массу навески фракции определяли, используя динамометр цифровой AMF-500. После определения массы навесок каждой фракции измельченного корма рассчитывали процентное содержание каждой фракции.

Статистическую обработку полученных результатов осуществляли с использованием надстройки «Пакет анализа» в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Для снижения энергоемкости измельчения кормов в разработанном измельчителе была предусмотрена система «старт-стоп», которая отключает электродвигатели при отсутствии в бункере или на ленте транспортера измельчаемого корма.

Разработанная система «старт-стоп» выполнена на базе микроконтроллера Arduino Uno R3 с использованием двух ультразвуковых датчиков расстояния HC-SR04, 6-и канального блока реле, а также звукового модуля KY-012.

Принцип работы данной системы сводится к следующему: ультразвуковые датчики расстояния HC-SR04, расположенные на корпусе бункера и выгрузного окна транспортера, в режиме реального времени осуществляют контроль за заполнением бункера или ленты транспортера. При фиксировании ультразвуковыми датчиками отсутствия измельчаемого продукта в бункере или на ленте транспортера в течение 20 секунд микроконтроллер Arduino Uno R3 подает сигнал на 6-канальный релейный модуль для отключения электродвигателей транспортера и измельчителя, подключенных через реле. В этот же момент микроконтроллер подает сигнал на звуковой модуль KY-012, работа которого служит для оператора звуковым сигналом о приостановке работы измельчителя и транспортера. При загрузке измельчаемого корма на ленту транспортера или в бункер ультразвуковые датчики HC-SR04 фиксируют изменение расстояния от датчика до измельчаемого корма и подают сигнал на микроконтроллер Arduino Uno R3,

который в свою очередь через 6–канальный блок реле инициирует подачу электрического тока на электродвигатели измельчителя и транспортера, а также на отключение звукового модуля.

Использование предложенной системы «старт-стоп» не требует постоянного контроля наполнения бункера измельчителя со стороны оператора, позволяет минимизировать работу измельчителя на холостом ходу при циклической и неравномерной подаче измельчаемого корма в бункер и тем самым предотвратить нерациональные энергозатраты.

Использование звукового модуля позволяет повысить безопасность использования измельчителя за счет подачи звукового сигнала оператору о готовности установки к работе, но отсутствии измельчаемого материала в бункере.

Результаты лабораторных исследований экспериментального измельчителя кормов (рис. 3) при измельчении моркови представлены на рисунках 4 и 5.



Рис. 3 - Разработанный измельчитель кормов при проведении лабораторных исследований: 1 – измельчитель кормов, 2 – транспортер, 3 – загрузочный бункер, 4 - пульт управления

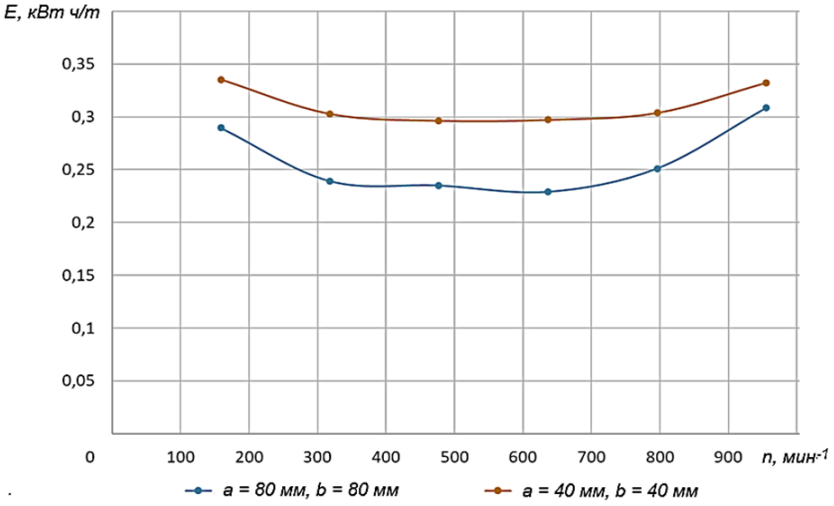


Рис. 4 - Влияние частоты вращения вала измельчителя на удельную энергоемкость измельчения моркови при использовании ячейки сетчатых рамок 25 мм: *a* – расстояние между гребнями ножей; *b* – расстояние между гребнями противорезов

Уравнение регрессии, характеризующее влияние частоты вращения вала измельчителя на удельную энергоёмкость измельчения при использовании сменных гребенчатых ножей и противорезов с расстоянием между гребенкой 80 мм, имеет вид

$E_{80} = 5 \cdot 10^{-7} n^2 - 0{,}0005n + 0{,}3537$, (1)

где E – удельная энергоемкость измельчения, кВт·ч/т;

n – частота вращения вала измельчителя, мин$^{-1}$.

При использовании гребенчатых ножей и противорезов с расстоянием между гребенкой 40 мм

$E_{40} = 3 \cdot 10^{-7} n^2 - 0{,}0003n + 0{,}3718$. (2)

Значение коэффициента корреляции (равное 0,97) для уравнений 1 и 2 указывает на то, что связь между частотой вращения измельчающего аппарата и энергоемкостью измельчения в разработанном измельчителе значительная.

Анализ влияния частоты вращения на удельную энергоемокость резания моркови свидетельствует, что наименьшая энергоемкость измельчения моркови при использовании разработанного измельчителя кормов наблюдается при частоте вращения от 300 до 800 мин$^{-1}$. Снижение энергоемкости измельчения моркови при увеличении частоты вращения в интервале от 159 мин$^{-1}$ до 300 мин$^{-1}$ связано со снижением удельного усилия резания моркови по мере увеличения скорости, что подтверждается ранее полученными данными по изучению влияния скорости резания на удельное усилие резания корнеплодов [15, 16]. Увеличение энергоемкости измельчения от 600 мин$^{-1}$ до 955 мин$^{-1}$ связано с многократным воздействием ножей на измельчаемый продукт и избыточным его переизмельчением.

Энергоемкость измельчения моркови при использовании ножей и противорезов с расстоянием между гребенками 80 мм в интервале частоты вращения вала измельчителя от 159 мин$^{-1}$ до 300 мин$^{-1}$ по сравнению с ножами и противорезами, имеющими расстояние между гребенками равное 40 мм, ниже на 20…23%.

Кроме энергоемкости измельчения не менее важным параметром является пропускная способность измельчителя. Согласно зоотехническим требованиям измельченные корнеплоды должны быть скормлены животным не более чем через 2 часа после измельчения из-за интенсивного протекания микробиологических процессов в измельченном продукте. Результаты исследований влияния частоты вращения вала измельчителя на его пропускную способность при использовании ячейки сетчатых рамок 25 мм представлены на рисунке 5.

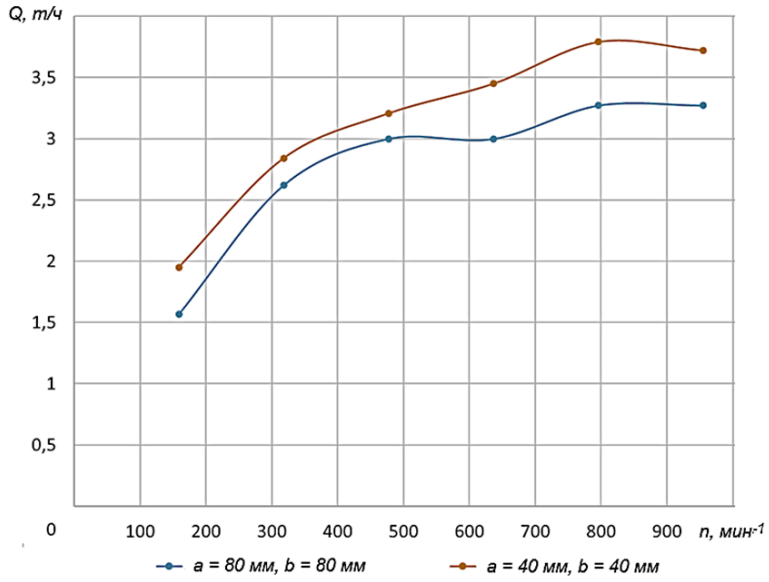


Рис. 5- Влияние частоты вращения вала измельчителя на его пропускную способность при использовании ячейки сетчатых рамок 25 мм: *a* – расстояние между гребнями ножей; *b* – расстояние между гребнями противорезов

Уравнение регрессии, характеризующее влияние частоты вращения вала измельчителя на его пропускную способность при использовании сменных гребенчатых ножей и противорезов с расстоянием между гребенкой 80 мм, имеет вид

$$Q_{80} = -4 \cdot 10^{-6} n^2 + 0{,}0064n + 0{,}7901, \quad (3)$$

где Q – пропускная способность измельчителя, т/ч.

При использовании гребенчатых ножей и противорезов с расстоянием между гребенкой 40 мм

$$Q_{40} = -3 \cdot 10^{-6} n + 0{,}006n + 1{,}1492. \quad (4)$$

Коэффициенты корреляции, равные 0,94 для уравнения (3) и 0,98 для уравнения (4), указывают на значительную связь между частотой вращения вала измельчающего аппарата и пропускной способностью измельчителя.

При анализе полученных данных лабораторных исследований по определению пропускной способности измельчителя в зависимости от частоты вращения вала измельчающего аппарата установлено, что наиболее интенсивное увеличение пропускной способности наблюдается при увеличении частоты вращения вала измельчающего аппарата до 400 мин$^{-1}$. Максимальная пропускная способность достигается при частоте вращения вала измельчителя 800 мин$^{-1}$, пропускная способность при использовании ножей и противорезов с расстоянием между гребнями 80 мм

достигает 3,3 т/ч, а при использовании ножей и противорезов с расстоянием между гребнями 40 мм - 3,8 т/ч.

Использование ножей и противорезов с расстоянием между гребенками 40 мм по сравнению с расстоянием 80 мм обеспечивает увеличение пропускной способности на 15%.

Ключевым параметром измельчения корнеплодов является фракционный состав измельченного продукта, поскольку это является одним из критериев соответствия измельченного корма зоотехническим требованиям [17, 18, 19]. Для крупного рогатого скота рекомендуется фракционный состав 10...15 мм.

В таблице 1 представлены результаты определения фракционного состава измельченной в предлагаемом измельчителе моркови при использовании гребенчатых ножей и противорезов с расстоянием между гребнями 80 мм.

Таблица 1 - Фракционный состав измельченной моркови при использовании гребенчатых ножей и противорезов с расстоянием между гребнями 80 мм

Процентное содержание измельченных частиц по фракциям, %	Частота вращения вала измельчителя кормов, мин$^{-1}$			
	318	477	637	796
до 10 мм	25	29,4	33,9	40,1
10…15 мм	44,6	42,4	40,5	39,6
15…20 мм	14,3	14,8	13,7	11,4
20…25 мм	16,1	13,4	11,9	8,9

Учитывая комплексное влияние частоты вращения вала измельчителя на пропускную способность, удельную энергоемкость измельчения и фракционный состав измельченного продукта, выбор частоты вращения вала является важной составляющей оптимизации параметров разработанного измельчителя кормов. Проанализировав данные, представленные на рисунках 4 и 5, а также показатели таблицы, установлено, что наиболее рациональной частотой вращения вала электродвигателя измельчителя является 400 мин$^{-1}$. При этом пропускная способность измельчителя составляет 2,8 т/ч, удельная энергоемкость измельчения – 0,23 кВт·ч/т и доля измельченных частиц размером 10…15 мм составляет 43,5%.

Проведенный анализ научных исследований по изучаемой тематике [3, 4, 19], а также существующих конструкций измельчителей кормов показал, что предлагаемая конструкция измельчителя обеспечивает меньшую энергоемкость измельчения, равную 0,23 кВт·ч/т.

Разработанная система «старт-стоп» позволяет дополнительно снизить энергозатраты измельчителя кормов за счет минимизации работы измельчителя на холостом ходу. Такая система ранее не применялась на измельчителях кормов, как серийного производства, так и в измельчителях, предложенных другими исследователями.

Полученные результаты производственных испытаний, проведенных на базе животноводческого комплекса ООО «Агро-Н» Новоспасского района Ульяновской области, позволили подтвердить результаты лабораторных исследований и рекомендовать разработанный измельчитель кормов для сельскохозяйственных предприятий, занимающихся выращиванием крупного рогатого скота.

Выводы. Предложенная конструкция измельчителя кормов, отличающаяся использованием плоских ножей на верхнем ярусе и гребенчатых ножей на нижнем ярусе измельчающего аппарата с гребенчатыми противорезами, имеющими расстояние между гребнями 80 мм, подтвердила его эффективность при измельчении моркови. Толщина ножей и гребенок составляет 3 мм, а угол заточки 10 градусов. Оптимальным режимом работы измельчителя является: частота вращения вала измельчителя 400 мин$^{-1}$, которая соответствует пропускной способности 2,8 т/ч. Удельная энергоемкость измельчения равна 0,23 кВт·ч/т, доля измельченных частиц размером 10…15 мм при этом составляет 43,5 %.

Разработанная для измельчителя кормов система «старт-стоп» позволяет минимизировать работу измельчителя на холостом ходу при циклической и неравномерной подачи измельчаемого корма в загрузочный бункер и тем самым снизить нерациональное использование энергоресурсов при измельчении кормов.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-26-00057, https://rscf.ru/project/24-26-00057/.

Литература

1. Оценка продовольственной безопасности России / И.Н. Сафиуллин, Б.Г. Зиганшин, Э.Ф. Амирова и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021 Т. 16. № 2(62). С. 124-132. doi 10.12737/2073-0462-2021-124-132.

2. Туманова М. И., Тимофеев А. С. Кормление КРС // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 4-2 (75). С. 199-201.

3. Хабарова В. В. Разработка измельчителя корнеплодов с обоснованием его параметров и режимов работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Уфа, 2011. 83 с.

4. Мамахай А. К. Повышение эффективности использования измельчителя кормовой свёклы: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01. Волгоград, 2022. 183 с.

5. Заплетников И. Н., Шеина А. В., Гордиенко А. В. Экспериментальные исследования процесса резания растительных материалов // Актуальные вопросы современной науки. 2013. № 3. С. 52-61

6. Обоснование параметров рабочего органа измельчителя корнеклублеплодов / М. Г. Загоруйко, В. В. Васильчико, Ю. В. Катаев и др. // Агроинженерия. 2021. №3 (103). С. 42-48. doi: 10.26897/2687-1149-2021-3-42-48

7. Савиных П. А., Булатов С. Ю., Смирнов Р. А. Измельчитель корнеклубнеплодов // Сельский механизатор. Москва: ОАО «Кострома», 2013. Вып. 8. С. 40–41.

8. Тимофеев М. Н., Фролов В. Ю., Морозова Н. Ю. Анализ технических средств для измельчения кормов и их классификация // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 132. С. 399-424.

9. Елисеев М. С., Загоруйкой М. Г., Рыбалкин Д. А. Анализ факторов, влияющих на эффективность процесса измельчения // Аграрный научный журнал. 2017. №7. С.62-66.

10. Обоснование конструктивных параметров ножей при резании плоского слоя продукта / С. В. Вендин, В.А. Самсонов, Ю.В. Саенко и др. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 4(36). С. 101-104.

11. Антонов Н. М., Лебедь Н. И., Мамахай А. К. Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 3 (43). С. 231-238.

12. Определение энергоемкости процесса измельчения резанием в измельчителе кормов / Р. С. Пополднев, Б. Г. Зиганшин, А. В. Алешкин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 4(72). С. 82-88.

13. Результаты производственных испытаний экспериментального измельчителя корнеплодов / В. В. Новиков, В. С. Зотеев, О.А. Камышева и др. // Известия Оренбургского ГАУ. Оренбург: Изд. центр ОГАУ, 2017. № 2(64). С. 75–77.

14. Spagnoli A. Cutting resistance of soft materials: effects of blade in-clination and friction // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. No. 101. P. 200-206. doi:10.1016/j.tafmec.2019.02.017

15. Изучение процесса резания кормовой свеклы / Н. П. Аюгин, Н. М. Семашкин, В И. Курдюмов и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024 №4 (68). С. 173-181. doi:10.18286/1816-4501-2024-4-173-18

16. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces S. Schuldt, Y. Schneider, H. Rohm, et al. // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 230. P. 55-62. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024

17. Borotov A. Cutting length the fodders of green stalks by drum chopper // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020 Vol. 883. No. 1 P. 12160

18. Theoretical aspects of root crop grinder development / N .P. Ayugin, A. V. Morozov, M. V. Ulyanov, et al. // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1045. No. (1). P. 012126. doi:10.1088/1755-1315/1045/1/012126

19. Булатов С. Ю., Смирнов Р. А. Анализ факторов, влияющих на рабочий процесс измельчителя корнеплодов // Вестник НГИЭИ. 2012 № 10 (29). С.15-23.

Сведения об авторах:

Аюгин Николай Петрович - кандидат технических наук, доцент кафедры технологии производства и ремонта машин, e-mail: nikall85g@yandex.ru

Яковлев Сергей Александрович - доктор технических наук, профессор кафедры технологии производства и ремонта машин, e-mail: jakseal@mail.ru

Исаев Юрий Михайлович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и физики, e-mail: isurmi@yandex.ru

Калашников Илья Андреевич - аспирант, e-mail: surskboy@vk.com

Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Ульяновск, Россия.

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT FEED GRINDER

N. P. Ayugin, S. A. Yakovlev, Yu. M. Isaev, I. A. Kalashnikov

Abstract. The relevance of research on the development of feed grinding is determined by the importance of technological process of feed preparation for feeding, which significantly affects the productivity and health of livestock, as well as the overall economic performance of livestock farming. The efficiency of feed grinders is determined by two factors: energy consumption for grinding and compliance of the ground feed with zootechnical requirements. This study examines development of a feed grinder based on energy-saving principles, not only through optimization of design and operating parameters of grinding unit, but also through the creation of a start-stop system for grinder, which minimizes idle operation during cyclical and uneven feed of the ground feed into the loading hopper. This reduces the inefficient use of energy resources when grinding feed in accordance with zootechnical requirements. The goal of this study is to reduce the energy consumption of root crop grinding by developing a feed grinder, substantiating its design and operating parameters, and developing a start-stop system. The design of grinder proposes the use of flat knives in the upper tier and comb knives in the lower tier, as well as comb counter-cuts with an 80 mm spacing between the combs and mesh frames with 25 mm mesh size. The specific energy consumption of developed feed grinder for chopping carrots is 0.23 kWh/t, the throughput is 2.8 t/h and the yield of 10 to 15 mm fraction is 43.5%. The results of production tests conducted at the livestock complex of Agro-N LLC in Novospasskiy district of Ulyanovsk region confirmed the laboratory results and recommended the developed feed grinder for agricultural enterprises raising cattle.

Key words: grinder, feed, specific energy consumption, particle size distribution, throughput, carrots, start-stop.

References

1. Safiullin IN, Ziganshin BG, Amirova EF. [Assessment of food security in Russia]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 2(62). 124-132 p. doi 10.12737/2073-0462-2021-124-132.

2. Tumanova MI, Timofeev AS. [Feeding cattle]. Novaya nauka: Teoreticheskiy i prakticheskiy vzglyad. 2016; 4-2 (75). 199-201 p.

3. Khabarova VV. Razrabotka izmelchitelya korneplodov s obosnovaniem ego parametrov i rezhimov raboty: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01. [Development of a root crop chopper with justification of its parameters and operating modes:

dissertation for a degree of Ph.D. of Technical Sciences: 05.20.01]. Ufa. 2011; 83 p.

4. Mamakhay AK. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya izmelchitelya kormovoy svekly: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01. [Improving the efficiency of using a fodder beet shredder: dissertation for a degree of Ph.D. of Engineering Sciences: 05.20.01]. Volgograd. 2022; 183 p.

5. Zapletnikov IN, Sheina AV, Gordienko AV. [Experimental studies of the process of cutting plant materials]. Aktualnye voprosy sovremennoy nauki. 2013; 3. 52-61 p.

6. Zagoruyko MG, Vasilchiko VV, Kataev YuV. [Justification of parameters of working unit of a root crop shredder]. Agroinzheneriya. 2021; 3(103). 42-48 p. doi: 10.26897/2687-1149-2021-3-42-48

7. Savinykh PA, Bulatov SYu, Smirnov RA. [Root crop chopper]. Selskiy mekhanizator. Moscow: OAO Kostroma. 2013; issue 8. 40-41 p.

8. Timofeev MN, Frolov VYu, Morozova NYu. [Analysis of technical means for feed chopping and their classification]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017; 132. 399-424 p.

9. Eliseev MS, Zagoruykoy MG, Rybalkin DA. [Analysis of factors influencing the efficiency of the chopping process]. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2017; 7. 62-66 p.

10. Vendin SV, Samsonov VA, Saenko YuV. [Justification of design parameters of knives when cutting a flat layer of product]. Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva. 2019; 4 (36). 101-104 p.

11. Antonov NM, Lebed NI, Mamakhay AK. [Optimization of design parameters of fruit and root crop chopper]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2016; 3 (43). 231-238 p.

12. Popoldnev RS, Ziganshin BG, Aleshkin AV. [Determination of the energy consumption of cutting grinding process in a feed grinder]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 4 (72). 82-88 p.

13. Novikov VV, Zoteev VS, Kamysheva OA. [Results of production tests of experimental root crop grinder]. Izvestiya Orenburgskogo GAU. Orenburg: Izd. tsentr OGAU. 2017; 2 (64). 75-77 p.

14. Spagnoli A. Cutting resistance of soft materials: effects of blade inclination and friction. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019; No.101. 200-206 p. doi:10.1016/j.tafmec.2019.02.017

15. Ayugin NP, Semashkin NM, Kurdyumov VI. [Study of fodder beet cutting process]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 4 (68). 173-181 p. doi:10.18286/1816-4501-2024-4-173-18

16. Schuldt S, Schneider Y, Rohm H. High-speed cutting of foods: cutting behavior and initial cutting forces. Journal of Food Engineering. 2018; Vol.230. 55-62 p. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024

17. Borotov A. Cutting length the fodders of green stalks by drum chopper. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020; Vol.883. No.1. 12160 p.

18. Ayugin NP, Morozov AV, Ulyanov MV. Theoretical aspects of root crop grinder development. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022; Vol.1045. No. (1). 012126. doi:10.1088/1755-1315/1045/1/012126

19. Bulatov SYu, Smirnov RA. [Analysis of factors influencing on operating process of a root crop chopper]. Vestnik NGIEI. 2012; 10 (29). 15-23 p.

Authors:

Ayugin Nikolay Petrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Machine Production and Repair Technology, e-mail: nikall85g@yandex.ru

Yakovlev Sergey Aleksandrovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Machine Production and Repair Technology, e-mail: jakseal@mail.ru

Isaev Yuriy Mikhaylovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mathematics and Physics Department, e-mail: isurmi@yandex.ru

Kalashnikov Ilya Andreevich – post-graduate student, e-mail: surskboy@vk.com

Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-85-92
УДК 62.838

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЭС ТЯГОВОГО КЛАССА 0,6 С АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Н. А. Майстренко, С. Ю. Уютов

Реферат. В данной статье описано проведение экспериментальных исследований мобильного энергосредства (МЭС) с автономным электроприводом тягового класса 0,6 в полевых условиях для оценки его функциональных свойств. Объектом исследования является МЭС тягового класса 0,6 на базе самоходных шасси Т-16 с электроприводом. Замена механической силовой передачи с ДВС на автоматизированный электропривод с ЭД позволила изменить некоторые характеристики МЭС. Цель исследования – оценка функциональных свойств МЭС тягового класса 0,6 с применением автономного ЭП в качестве силовой установки путем проведения экспериментальных исследований в полевых условиях. Площадка для полевых измерений представляла собой клетку поля учебно-опытного хозяйства территории полевой опытной станции РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Экспериментальные исследования режимов движения мобильного энергосредства (разгон и установившийся режимы), приведенные в рамках настоящей статьи, проводились на фоне стерня колосовых. Высота стерни составляла 0,12-0,15 м, влажность почвы 12-13%. Время испытаний – летний (послеуборочный) период года. Повторность измерений принята троекратной, скорость движения МЭС - 1,5 м/с. Результатом проведённых исследований показали снижение эксплуатационной массы в среднем на 300 кг, улучшились тягово-сцепные и динамические показатели. Получены относительные изменения тягового КПД для варианта МЭС с ДВС – 0,652, для -варианта МЭС с электроприводом - 0,680. Максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний центра масс МЭС, составляет не более 3,03 при максимально допустимом значении в 4,0. Для совершенствования функциональных характеристик МЭС по энергообеспечению и по энергоэффективности при дальнейшем освоении серийного производства МЭС, необходимо сохранить принципиальную схему электромеханической трансмиссии. Однако, необходим выбор более оптимальной схемы соединений с минимальным омическим сопротивлением и подбором новых литий-ионных АКБ с увеличенной емкостью.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, автономный электропривод, электродвигатель, мобильное энергетическое средство, трактор.

Введение. Расчетно-экспериментальные исследования в области сельского хозяйства, в частности исследования мобильных энергосредств (МЭС), проводятся регулярно. Выбор направления проводимых исследования может быть связан с особенностями почвенно-климатических условий региона, как в статьях [1, 2]. Давление на почву, оказываемое МЭС и его орудиями, изучение его влияния, прогнозирование и оптимальное распределение являются направлениями для экспериментов, рассмотренные в статьях [3, 4, 5], Изучением движения МЭС, в частности, влияние неровностей почвы [6, 7, 8], прицепного оборудования и скорости МЭС на его траекторию и возможность управления опрокидыванием МЭС занимались в работе [9]. В публикациях [10, 11] выясняли может ли форма МЭС значительно влиять на его работу. А в статье [12] экспериментировали со схемой управления беспилотным трактором. Нагруженность и ее влияние на эффективность МЭС также является темой исследований, по которой проводятся эксперименты в статьях [13, 14]. Гибридный алгоритм оценки массы системы тягача-полуприцепа экспериментально проверялся в статье [15]. Различные варианты топлива и способы их подачи, влияющие на работу МЭС также становятся темами исследований, как в статьях [16, 17]. Экспериментами по замене силовых систем, работающих на углеродном топливе и использующих двигатели внутреннего сгорания (ДВС), на более экологичные системы с водородными топливными элементами занимались в статьях [18, 19]. Помимо экспериментов, связанных с изменениями в конструкциях тракторов, проводятся и эксперименты, направленные на проверку методик испытаний и подтверждение их адекватности как в статьях [20, 21].

Анализ вышеприведенных научных работ подтверждает, что применение электропривода (ЭП) в машинах сельскохозяйственного назначения одна из актуальных задач в настоящее время. В связи с этим, экспериментальные данные, полученные в реальных условиях эксплуатации МЭС, имеют первостепенную значимость при проектировании качественно новой машины.

Цель исследования – оценка функциональных свойств МЭС тягового класса 0,6 с применением автономного ЭП в качестве силовой установки путем проведения экспериментальных исследований в полевых условиях.

Условия, материалы и методы. Объектом исследования является МЭС тягового класса 0,6 на базе самоходных шасси Т-16 с ЭП. Электропривод был установлен взамен классического двигателя внутреннего сгорания. Мощность электродвигателя составляла 11 кВт, двигателя внутреннего сгорания 18 кВт. Вал электродвигателя напрямую соединен с первичным валом

коробки переключения передач. Первичным источником энергии служит блок аккумуляторных батарей. ЭД через векторный преобразователь частоты подключен к блоку аккумуляторных батарей. После переоборудования масса объекта исследования снизилась с 1800 кг до 1500 кг.

Программа-методика экспериментальных исследований по разработанному и изготовленному макетному образцу МЭС с ЭП силовой передачи позволит получить новые экспериментальные данные для верификации коэффициентов математической модели, подтверждения её адекватности, установление эффективности внедрения электрического привода в силовую передачу мобильного энергетического средства тягового класса 0,6. Первоначальным шагом перед проведением испытаний был расчет координаты центра тяжести макетного образца для этого были установлены датчики для считывания опорных реакций на колесах, что было подробно рассмотрено в работах [22, 23].

После разработки и изготовления экспериментальной установки, подбора комплекта необходимого регистрирующего оборудования, а также измерительных приборов, удалось определить в реальных условиях эксплуатации основные силовые характеристики работы МЭС.

Для обработки полученных экспериментальных данных, (ускорения отдельных масс МЭС - центра масс остова, центра масс бортов) применялся коэффициент интенсивности восприятия колебаний $K_{инт}$, определяемый по методике, приведенной в работах [17, 18].

Коэффициент интенсивности $K_{инт}$ рассчитывался по формуле:

$$K_{инт} = \frac{18}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \cdot \sigma_{\ddot{z}} \qquad (1)$$

где $\sigma_{\ddot{z}}$ – среднее квадратическое отклонение вертикальных ускорений при гармонических колебаниях,

$\omega_0 = 62{,}8$ с-1 – частота приведения,

ω – частота колебаний.

Площадка для полевых испытаний представляла собой клетку поля учебно-опытного хозяйства НА территории полевой опытной станции РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева. Нагрузка на крюке МЭС осуществлялось при помощи транспортного прицепа 2ПТСЕ. Бортовой компьютер, сопряженный с датчиками, а также генератор для его питания разместили в кузове МЭС.

Опыты проводились на горизонтальном участке поля с уклоном не более 2° при строго прямолинейном движении. После осуществления подготовки машины в стационарных условиях (зарядка аккумулятора, калибровка датчиков и настройка приборов) МЭС направлялся в поле, где производилась дополнительная проверка работы приборов. Исследования режимов движения трактора (разгон и установившийся режимы) проводились на различных фонах: на грунтовой дороге, на стерне и на поле, подготовленном под посев. В рамках настоящей статьи представлены исследования только на стерне.

Время испытаний – летний (послеуборочный) период года. Повторность принята троекратной. Высота стерни составляла 0,12-0,15 м, влажность почвы 12-13%, скорость движения МЭС — 1,5 м/с. Общий вид МЭС при испытаниях представлен на рисунке 1.



Рис. 1 – МЭС при испытаниях на стерне

Тягово-энергетические показатели были определены по измеренным значениям для опытного МЭС с ДВС и МЭС с электродвигателем.

Необходимо соблюдение баланса мощности и тягового КПД мобильного энергосредства:

$$\eta_т = \eta_{тр} \cdot \eta_\delta \cdot \eta_f \quad (2)$$

$$N_т = N_в - N_{пот} = N_в - N_{тр} - N_\delta - N_f, \text{ кВт} \quad (3)$$

где N_e – мощность двигателя мобильного энергосредства, кВт;

$N_{пот}$ – суммарные потери мощности двигателя на движение мобильного энергосредства.

$N_{тр}$ – потери мощности в трансмиссии мобильного энергосредства, кВт;

N_δ – потери мощности на буксование, кВт.

N_f – потери мощности на качение мобильного энергосредства, кВт;

η_δ – КПД мобильного энергосредства по буксованию.

η_f – КПД мобильного энергосредства по качению.

$\eta_{тр}$ – механический КПД трансмиссии.

$\eta_т$ – тяговый КПД мобильного энергосредства.

Значения тягового КПД определяют по формуле

$$\eta_m = (1-\delta) \cdot \eta_{mp} \cdot \frac{P_{кр}}{P_к} \quad (4)$$

где $P_{кр}$ – сила сопротивления на крюке мобильного энергосредства, кН;

$P_к$ – сила касательная на колесе мобильного энергосредства, кН.

δ – коэффициент буксования на заданном режиме;

Рассчитываются значения действительных скоростей движения по формуле:

$$V_д = (1 - \delta_x)\omega_k \cdot r_k \text{ , м/с,} \quad (5)$$

где δ_x – коэффициент буксования на заданном режиме;

ω_k – угловая скорость колеса, рад/с;

r_k – угловая скорость колеса, м.

Составляющие тягового КПД мобильного энергосредства и потерь мощности двигателя по формулам:

$$N_{тр} = N_в (1 - \eta_{тр}) \text{ ,кВт,} \quad (6)$$

где $N_{тр}$ – потери мощности в трансмиссии мобильного энергосредства, кВт;

$\eta_{тр}$ – механический КПД трансмиссии.

$$N_\delta = N_в \cdot \eta_{тр} \cdot \delta_x \text{ , кВт,} \quad (7)$$

где N_δ – потери мощности на буксование, кВт.

$$\eta_\delta = 1 - \delta_x \quad (8)$$

где η_δ – КПД мобильного энергосредства по буксованию.

$$N_f = P_f \cdot V_o; \quad \eta_f = \frac{P_{кр}}{P_к} \quad (9)$$

где N_f – потери мощности на качение мобильного энергосредства, кВт;

P_f – сила сопротивления качению, кН;

$V_д$ – действительная скорость движения мобильного энергосредства, м/с;

η_f – КПД мобильного энергосредства по качению.

Полученные значения заносят в таблицу 3.

Тяговая мощность мобильного энергосредства, только с учетом тягового КПД определяется по формуле:

$$N_т = N_в \cdot \eta_т \text{ , кВт.} \quad (10)$$

где N_e – мощность двигателя мобильного энергосредства, кВт;

$\eta_т$ – тяговый КПД мобильного энергосредства.

Результаты и обсуждение. В результате проведения испытаний были получены экспериментальные осциллограммы измеряемых параметров на фоне – стерня, часть результатов приведена на рисунках 2-4.

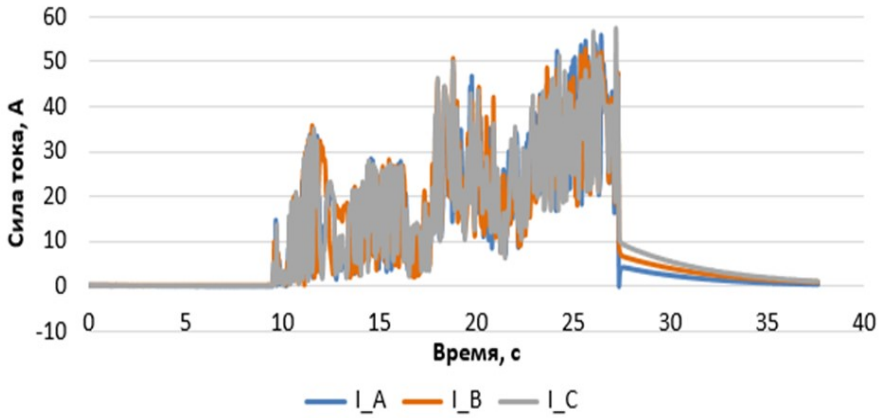


Рис. 2 – Осциллограмма фазных токов при измерениях на стерне во времени

Анализ измерений, при котором МЭС-прототип, с прицепом в качестве нагрузки на крюке, двигался по стерне на 4 передаче приведен ниже.

Осциллограмма тяговой нагрузки приведена на рисунке 3, осциллограмма ускорения центра масс остова МЭС представлена на рисунке 4.

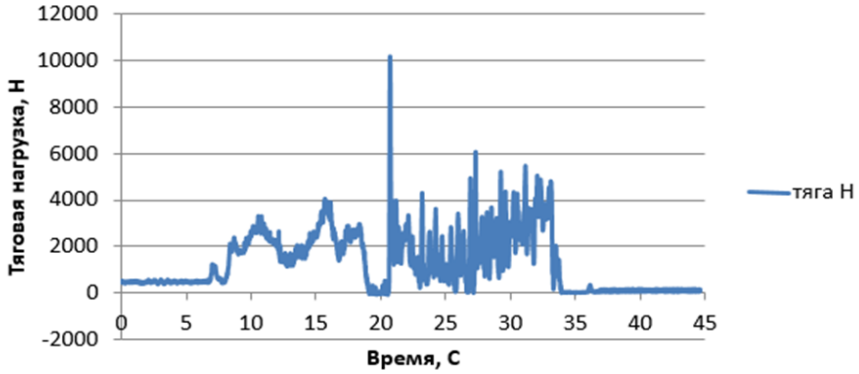


Рис. 3 – Осциллограмма тяговой нагрузки при измерениях на стерне

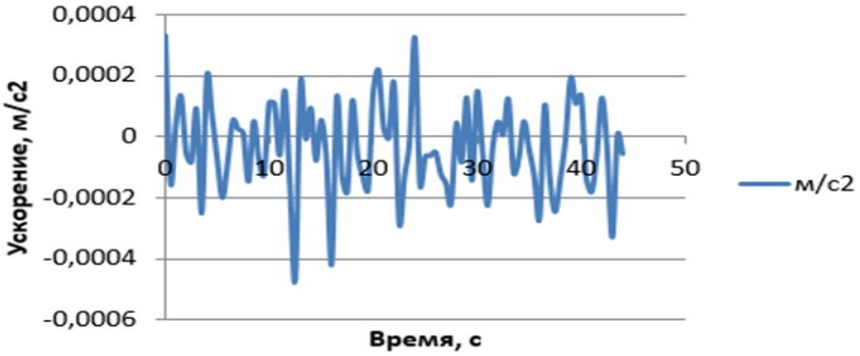


Рис. 4 – Осциллограмма горизонтальных ускорения центра масс остова МЭС

В программной среде MathCad Prime 4.0 был проведен спектральный анализ сигналов измеряемых величин. Были получены спектральные плотности этих сигналов. Нормированные спектральные плотности показаны на рисунках 5, 6.

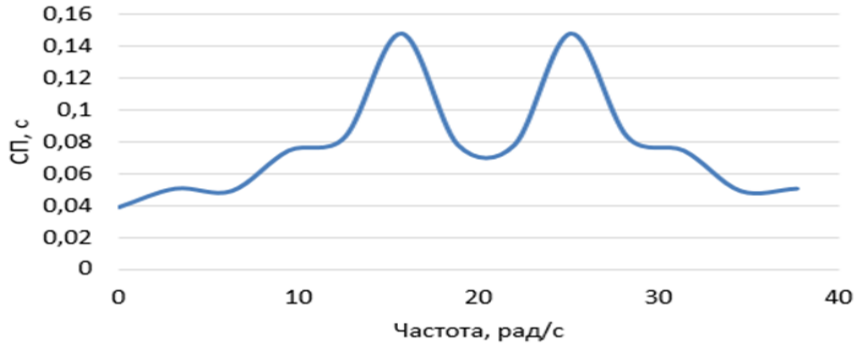


Рис. 5 – Нормированная спектральная плотность горизонтальных ускорений остова МЭС при частотах возмущений

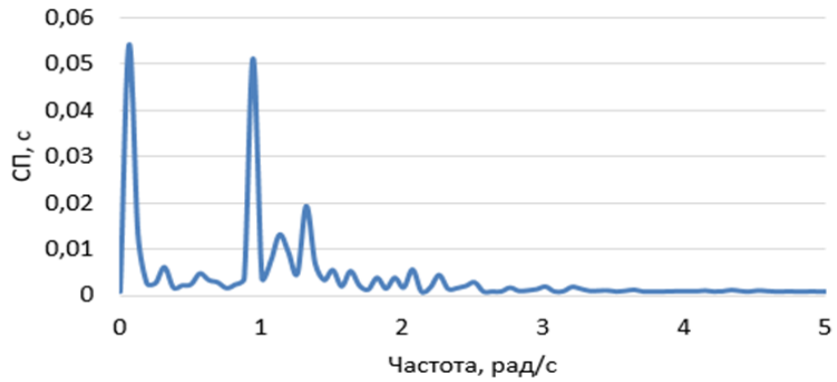


Рис. 6 – Нормированная спектральная плотность тягового сопротивления при частотах возмущений

Нормированная спектральная плотность ускорений центра масс МЭС (рис. 5) имеет две ярко выраженные преобладающие частоты на отметках ω_1=15,5 рад/с и ω_2=25,5 рад/с. Эти частоты нам необходимы для определения коэффициента интенсивности восприятия по данным с датчиков ускорений левого – $К_{лев}$, правого бортов – $К_{прав}$, а также центра масс МЭС – $К_{центр}$ (табл. 1).

Нормированная спектральная плотность тягового сопротивления (рис. 6) имеет ярко выраженные преобладающие частоты на отметках ω_1=0,38 рад/с; ω_2=0,88 рад/с; ω_3=1,26 рад/с.

Таблица 1 – Таблица коэффициентов интенсивности восприятия

№	$К_{лев}$	№	$К_{прав}$	№	$К_{центр}$
1	1,99	1	2,76	1	2,12
2	2,84	2	-	2	3,03

Анализ таблицы 1 показывает, что, конструктивные изменения, а именно установка автономного ЭП улучшают условия труда оператора за счет понижения вибраций в центре масс МЭС, при этом максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний составляет не более 3,03 (допускается - не более 4,0).

Вероятностные показатели случайных параметров опыта на стерне такие как математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики случайных величин показателей МЭС с ЭП

Параметры / Показатели	Мат. ожидание	Дисперсия	Ср. квадр. откл	Коэфф. вариации
Линейная скорость левого колеса, [м/с]	1,489	0,092	0,303	0,203
Сила тока фазы А, [А]	16,891	79,165	8,897	0,527
Сила тока фазы В, [А]	17,160	77,711	8,815	0,514
Сила тока фазы С, [А]	17,613	86,792	9,316	0,529

Анализируя таблицу 2 видно, что скорость МЭС в целом равномерна. Это показывает и коэффициент вариации, оценивающий относительный разброс данных относительно их среднего значения (позволяя сравнить разнородность наборов данных с разными средними значениями или единицами измерения). Однако сила тока по фазам в целом показывает высокую вариабельность. Несмотря на это, значительной разницы между фазными токами не выявлена, следовательно, проблем в обмотках статора или ротора (межвитковое замыкание, обрыв фазы или неравномерное распределение сопротивления) не обнаружено. Незначительные флуктуации нагрузки на электрическую систему имели эпизодический характер и не оказали ощутимого влияния во время проведения опытов.

Изменение ёмкости аккумуляторных батарей представлено на рисунке 7. На рисунке наглядно видно, что емкость батарей уменьшается с увеличением количества опытов (время эксплуатации). Учитывая то, что один опыт длился не более 5 минут, легко посчитать что ёмкость батарей очень быстро расходуется. Это является основным недостатком применения автономного ЭП.

Рисунок 7 подтверждает проведенные ранее исследования, где после 85 минут проведения опыта, начинается ускоренное снижение напряжения, связанное с исчерпанием активной (реакционной) массы и ростом внутреннего сопротивления, и уже после 95 минут достигается порог 400 В, после чего система управления отключает АКБ, предотвращая глубокий разряд.

Составляющие потерь мощности двигателя МЭС представлены в таблице 3. Конструктивные изменения показали изменение мощностных потерь.

Таблица 3 – Составляющие мощностных потерь МЭС

Источники мощностных потерь	Обозначение	Сравнение показателей	
		МЭС с ДВС (18,4 кВт)	МЭС с ЭД (11 кВт)
Трансмиссия	$\eta_{тр}$	0,9	0,9
	$N_{тр}$, кВт	1,84	1,10
Буксование	η_{δ}	0,92	0,92
	N_{δ}, кВт	1,325	0,792
Качение колеса	η_{f}	0,788	0,821
	N_{f}, кВт	2,663	2,163
МЭС в целом	$\eta_{т}$	0,652	0,68
	$N_{пот}$, кВт	5,828	4,055

Анализируя таблицу 3 видно, что потери мощности у МЭС с ЭД снизились на 30,4% за счет снижения потерь при качении колеса и общих потерь мощности при буксовании. Потери мощности на качение снизились по причине снижения массы МЭС. При этом за

счет более высокого КПД самого ЭД относительно ДВС, произошли изменения функциональных характеристик МЭС. Например, полученные значения тяговой мощности МЭС, только с учетом тягового КПД (рассчитанные по формуле 10) имеют следующие значения: для МЭС с ДВС – $N_т$, = 11,99 кВт; для МЭС с ЭД – $N_т$, = 7,48 кВт.

Экспериментальные исследования доказали, что установка ЭД в силовом приводе МЭС, взамен ДВС, улучшает условий труда оператора по виброзащите, при этом максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний центра масс МЭС, составляет не более 3,03 (допустимое - не более 4,0).

Выводы. По исследованиям, можно сделать следующие выводы:

1. Замена ДВС с механической силовой передачей на автоматизированный ЭП с ЭД не вызвала значительных изменений функциональных характеристик МЭС во время полевых испытаний;

2. Определено, что конструктивные изменения улучшают условия труда оператора, так как максимальное значение коэффициента интенсивности колебаний составляет не более 3,03 (допускается - не более 4,0).

3. Выявлено, что потери мощности у МЭС с ЭД снизились на 30,4% за счет уменьшения потерь мощности при качении колеса. Это произошло в том числе и за счет более высокого КПД самого ЭД (по отношению к ДВС), что вызвало значительные изменения других функциональных характеристик МЭС во время полевых испытаний.

4. Для совершенствования функциональных характеристик МЭС по энергообеспечению и по энергоэффективности при дальнейшем освоении серийного производства МЭС, необходимо сохранить принципиальную схему электромеханической трансмиссии. Однако, необходим выбор более оптимальной схемы соединений с минимальным омическим сопротивлением и подбором новых литийионных АКБ с увеличенной удельной энергоемкостью.

Литература

1. Халилов М. Б., Абдулнатипов М. Б. Исследование пахотного агрегата // Известия Дагестанского ГАУ. 2022. № 4(16). С. 308-312. doi:10.52671/26867591_2022_4_308.

2. Experiments and CFD simulation of an air-conditioned tractor cabin for thermal comfort of tractor operators in Pakistan / M. Riaz, M. H. Mahmood, M. N. Ashraf, et al. // Heliyon. 2023. Vol. 9 (12). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23038.

3. Исследования технологических параметров колёсного трактора в составе экспериментального прикатывающего агрегата / А. С. Шубин, Е. А. Яшков, Е. С. Поликутина и др.// Евразийское Научное Объединение. 2020. № 4-2(62). С. 139-142.

4. Development and validation of sloped ground pressure prediction model for a tracked tractor in hilly and mountainous environments / F. Yang, Q. Liu, H. Chu, et al. // Soil and Tillage Research. 2024. Vol. 241. P. 106135. doi: 10.1016/j.still.2024.106135.

5. Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems / V. Bulgakov, S. Pascuzzi, V. Nadykto, et al. // Soil & Tillage Research. 2021. Vol. 208. P. 104895. doi: 10.1016/j.still.2020.104895.

6. Optimizing ploughing performance: The role of traction-control cylinder pressure on tractor wheel load / J Čupera, P Porteš, F Bauer, et al. // Journal of Agriculture and Food Research. 2024. Vol. 18. P. 101515. doi: 10.1016/j.jafr.2024.101515.

7. Машков С. В., Ишкин П. А., Авдеев Д. А. Результаты лабораторно-полевых исследований культиватора модульного прицепного КМП-14 с ротационной бороной // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 3. С. 51-59. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-2-51-59.

8. Экспериментальные исследования динамики поворота интегрального универсально-пропашного трактора / А. И. Завражнов, В. И. Оробинский, А. Н. Беляев и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12. № 2(61). С. 48-59. doi: 10.17238/issn2071-2243.2019.2.48.

9. Старцев А. В., Романов С. В., Романова Г. М. Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента сопротивления самопередвижению машинно-тракторного агрегата // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 79-85. doi: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-79-85.

10. Algorithm and scale experiment of gyro-based tractor rollover control towards hilly farmland application / L. Wang, J. Zhu, F. Liu et al. // Computers and Electronics in Agriculture. 2024. Vol. 220. P. 108925. doi: 10.1016/j.compag.2024.108925.

11. Kücüksariyildiz H., Canli E., Carman K. Experimentally detected aerodynamic drag coefficient of the agricultural tractor form considering effects of windshield angle and hood front shape // Energy. 2024. Vol. 296. P. 131167. doi: 10.1016/j.energy.2024.131167.

12. Adaptive disturbance observer-based fixed time nonsingular terminal sliding mode control for path-tracking of unmanned agricultural tractors / J Sun, Z Wang, S Ding, et al. // Biosystems Engineering. 2024. Vol. 246. P. 96-109. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.06.013.

13. Подрубалов М. В., Клубничкин Е. Е., Бухтояров Л. Д. Экспериментальные исследования нагруженности трактора на уходе за лесными культурами с разными способами агрегатирования // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 4(44). С. 170-180. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15.

14. Определение средней крюковой нагруженности трактора в составе машинно-тракторного агрегата на вспашке / Д. Д. Нехорошев, Д. А. Нехорошев, А. Ю. Попов и др. // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 3 (47). С. 75-81.

15. Mass estimation of tractor-semitrailer systems: An approach of dynamics and data fusion-driven in real environments Y. Jin, Y. Li, B. He, et al. // Measurement. 2024. Vol. 238. P. 115367. doi: 10.1016/j.measurement.2024.115367.

16. Kalwar A., Singh A. P., Agarwal A. K. Experimental Study of Fuel Injection Timing and Exhaust Gas Recirculation for Combustion Control in Diethyl Ether-Diesel Blend Fuelled Tractor Engine // Fuel. 2024. Vol. 371.

P. 131930. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131930.

17. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: first results obtained with a mixed experimental-numerical approach / M Bietresato, C Caligiuri, M Renzi, et al. // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. P. 965-971. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.237.

18. Experimental validation of a predictive energy management strategy for agricultural fuel cell electric tractors / C Varlese, A Ferrara, C Hametner, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 77. P. 1-14. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.097.

19. Parameters collaborative optimization design and innovation verification approach for fuel cell distributed drive electric tractor / X. Li, M. Liu, C. Hu, et al. // Energy. 2024. Vol. 292. P. 130485. doi: 10.1016/j.energy.2024.130485.

20. Experimental characterisation of front axle suspension systems for narrow-track tractors / M. Mattetti, S. Davoli, M. Maraldi, et al. // Biosystems Engineering. 2019. Vol. 185. P. 45-55. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.013.

21. К методике экспериментальной оценки маневренности автомобиля / А. В. Артемов, А. В. Школьных, С. М. Иванников и др. // Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 12 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. С. 106-113. doi: 10.58168/AutIndustry2023_106-113.

22. Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25. № 1. С. 112-122. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122.

23. Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев и др. // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 1. С. 63-70. doi:10.26897/2687-1149-2023-1-63-70.

Сведения об авторах:

Годжаев Захид Адыгезал оглы – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, председатель экспертного совета ГНЦ РФ, e-mail: fic51@mail.ru
ФГУП «НАМИ», Москва, Россия.

Сенькевич Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ФН-7, e-mail: senkevichse@bmstu.ru
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Алексеев Илья Сергеевич – инженер лаборатории автоматизированного привода сельскохозяйственной техники, e-mail: dreeddog@mail.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

Майстренко Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, e-mail: nmaystrenko@rgau-msha.ru
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия.

Уютов Сергей Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории автоматизированного привода сельскохозяйственной техники, e-mail: uyutov10@mail.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

EXPERIMENTAL STUDIES OF MOBILE POWER VEHICLE OF 0.6 TRACTION CLASS WITH AN AUTONOMOUS ELECTRIC DRIVE

Z. A. Godzhaev, S. E. Senkevich, I. S. Alekseev, N. A. Maystrenko, S. Yu. Uyutov

Abstract. This article describes experimental field studies of a mobile power vehicle of 0.6 traction class with an autonomous electric drive to evaluate its functional properties. The object of the study is a mobile power vehicle of 0.6 traction class based on a T-16 self-propelled chassis with an electric drive. Replacing the mechanical power transmission with an internal combustion engine with an automated electric drive with an electric motor allowed us to change some characteristics of mobile power vehicle. The objective of the study is to evaluate the functional properties of a mobile power vehicle of 0.6 traction class using an autonomous electric drive as the power plant through experimental field studies. The field measurement site was a field cell of the educational and experimental farm of experimental station of Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. Experimental studies of the mobile power vehicle motion modes (acceleration and steady-state modes), presented within the framework of this article, were conducted against the background of cereal stubble. The stubble height was 0.12-0.15 m, soil moisture was 12-13%. The test period was the summer (post-harvest) period of the year. The measurements were repeated three times, motion speed of mobile power vehicle was 1.5 m/s. The results of the conducted studies showed a decrease in the operating weight by an average of 300 kg, improved traction and dynamic performance. The relative changes in traction efficiency were obtained for mobile power vehicle with an internal combustion engine of 0.652, for mobile power vehicle with an electric drive - 0.680. The maximum value of mobile power vehicle's center-of-mass oscillation intensity factor is no more than 3.03, with a maximum permissible value of 4.0. To improve mobile power vehicle's energy supply and energy efficiency during further development of vehicle serial production, the basic electromechanical transmission design must be maintained. However, a more optimal connection diagram with minimal ohmic resistance and the selection of new lithium-ion batteries with increased capacity are necessary.

Key words: experimental studies, autonomous electric drive, electric motor, mobile power vehicle, tractor.

References

1. Khalilov MB, Abdulnatipov MB. [Study of a plowing unit]. Izvestiya Dagestanskogo GAU. 2022; 4(16). 308-312 p. doi:10.52671/26867591_2022_4_308.

2. Riaz M, Mahmood MH, Ashraf MN. Experiments and CFD simulation of an air-conditioned tractor cabin for thermal comfort of tractor operators in Pakistan. Heliyon. 2023; Vol.9 (12). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23038.

3. Shubin AS, Yashkov EA, Polikutina ES. [Research of technological parameters of a wheeled tractor as part of an experimental rolling unit]. Evraziyskoe nauchnoe obedinenie. 2020; 4-2(62). 139-142 p.

4. Yang F, Liu Q, Chu H. Development and validation of sloped ground pressure prediction model for a tracked tractor in hilly and mountainous environments. Soil and tillage research. 2024; Vol.241. 106135 p. doi: 10.1016/j.still.2024.106135.

5. Bulgakov V, Pascuzzi S, Nadykto V. Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems. Soil and tillage research. 2021; Vol.208. 104895 p. doi: 10.1016/j.still.2020.104895.

6. Cupera J, Portes P, Bauer F. Optimizing ploughing performance: the role of traction-control cylinder pressure on tractor wheel load. Journal of Agriculture and Food Research. 2024; Vol.18. 101515 p. doi: 10.1016/j.jafr.2024.101515.

7. Mashkov SV, Ishkin PA, Avdeev DA. [Results of laboratory and field studies of KMP-14 modular trailed cultivator with a rotary harrow]. Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 3. 51-59 p. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-2-51-59.

8. Zavrazhnov AI, Orobinskiy VI, Belyaev AN. [Experimental studies of the turning dynamics of an integral universal row-crop tractor]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2019; Vol.12. 2(61). 48-59 p. doi: 10.17238/issn2071-2243.2019.2.48.

9. Startsev AV, Romanov SV, Romanova GM. [Results of experimental studies to determine the coefficient of resistance to self-movement of a machine-tractor unit]. Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal. 2021; 1. 79-85 p. doi: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-79-85.

10. Wang L, Zhu J, Liu F. Algorithm and scale experiment of gyro-based tractor rollover control towards hilly farmland application. Computers and Electronics in Agriculture. 2024; Vol.220. 108925 p. doi: 10.1016/j.compag.2024.108925.

11. Kucuksariyildiz H, Canli E, Carman K. Experimentally detected aerodynamic drag coefficient of the agricultural tractor form considering effects of windshield angle and hood front shape. Energy. 2024; Vol.296. 131167 p. doi: 10.1016/j.energy.2024.131167.

12. Sun J, Wang Z, Ding S. Adaptive disturbance observer-based fixed time nonsingular terminal sliding mode control for path-tracking of unmanned agricultural tractors. Biosystems Engineering. 2024; Vol.246. 96-109 p. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.06.013.

13. Podrubalov MV, Klubnichkin EE, Bukhtoyarov LD. [Experimental studies of tractor load during forest crop maintenance with different aggregation methods]. Lesotekhnicheskiy zhurnal. 2021; Vol.11. 4(44). 170-180 p. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15.

14. Nekhoroshev DD, Nekhoroshev DA, Popov AYu. [Determination of the average hook load of a tractor as part of a machine-tractor unit during plowing]. Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2023; 3(47). 75-81 p.

15. Jin Y, Li Y, He B. Mass estimation of tractor-semitrailer systems: an approach of dynamics and data fusion-driven in real environments et al. Measurement. 2024; Vol.238. 115367 p. doi: 10.1016/j.measurement.2024.115367.

16. Kalwar A, Singh AP, Agarwal AK. Experimental study of fuel injection timing and exhaust gas recirculation for combustion control in diethyl ether-diesel blend fuelled tractor engine. Fuel. 2024; Vol.371. 131930 p. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131930.

17. Bietresato M, Caligiuri C, Renzi M. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: first results obtained with a mixed experimental-numerical approach. Energy Procedia. 2019; Vol.158. 965-971 p. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.237.

18. Varlese C, Ferrara A, Hametner C. Experimental validation of a predictive energy management strategy for agricultural fuel cell electric tractors. International Journal of Hydrogen Energy. 2024; Vol.77. 1-14 p. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.097.

19. Li X, Liu M, Hu C. Parameters collaborative optimization design and innovation verification approach for fuel cell distributed drive electric tractor. Energy. 2024; Vol.292. 130485 p. doi: 10.1016/j.energy.2024.130485.

20. Mattetti M, Davoli S, Maraldi M. Experimental characterization of front axle suspension systems for narrow-track tractors. Biosystems Engineering. 2019; Vol.185. 45-55 p. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.013.

21. Artemov AV, Shkolnykh AV, Ivannikov SM. Towards a methodology for experimental assessment of vehicle maneuverability. Problems and prospects of design improvement of the domestic automobile industry]. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Voronezh, 12 aprelya 2023 goda. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet im. G.F.Morozova. 2023; 106-113 p. doi: 10.58168/AutIndustry2023_106-113.

22. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Alekseev IS. [Mathematical modeling of dynamic processes of an agricultural mobile power vehicle with an electric drive]. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2024; Vol.25. 1. 112-122 p. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122.

23. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Alekseev IS. [Justification for the selection of electromechanical transmission parameters for 0.6-0.9 traction class tractor and coordination of traction characteristics]. Agroinzheneriya. 2023; Vol.25. 1. 63-70 p. doi:10.26897/2687-1149-2023-1-63-70.

Authors:

Godzhaev Zakhid Adygezal oglu – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Chairman of the Expert Council of the State Research Center of the Russian Federation, e-mail: fic51@mail.ru
FSUE "NAMI", Moscow, Russia.
Senkevich Sergey Evgenevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of FN-7, e-mail: senkevichse@bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Alekseev Ilya Sergeevich – an engineer of the Laboratory of Automated Drives for Agricultural Machinery, e-mail: dreeddog@mail.ru
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.
Maystrenko Nikolay Aleksandrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Machine and Tractor Fleet Operation, e-mail: nmaystrenko@rgau-msha.ru
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazeva, Moscow, Russia.
Uyutov Sergey Yurevich – junior researcher of the Laboratory of Automated Drive of Agricultural Machinery, e-mail: uyutov10@mail.ru
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-93-99
УДК 536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ ДЛЯ ОБОГРЕВА ТЕПЛИЦ НА БАЗЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

В. Э. Зинуров, М. О. Уткин, А. В. Дмитриев, Д. Т. Халиуллин, О. С. Дмитриева

Реферат. В статье представлено численное моделирование замкнутой системы теплоснабжения для обогрева теплиц на основе тепловой трубы с фазовыми переходами, использующей водяной теплоноситель. Цель исследования – анализ термодинамических параметров в нестационарном режиме с акцентом на время стабилизации, распределение температур и давления при нагреве бака-испарителя. Математическая модель реализована в программном комплексе SimInTech. Бак-испаритель рассматривался как сосредоточенный объем с равномерными параметрами (нульмерная модель), а трубопроводы, как последовательность одномерных участков, в которых температура и давление изменяются вдоль длины. Каждый участок разбивался на сегменты, для которых решались уравнения сохранения массы, импульса и энергии с учетом фазового перехода «вода–пар» и теплообмена с грунтом. Получено, что при рассмотренных режимах естественной циркуляции система выходит на квазистационарное состояние в течение нескольких часов (порядка 2,2-4,3 ч), при этом давление пара в контуре возрастает примерно от 450 до 1500 кПа при увеличении температуры нагрева от 150 до 200°С. Температуры и давления в баке-испарителе и паровой линии практически совпадают (расхождение температур не превышает 1,5–2°С), что указывает на малые потери энергии при переносе тепла в паровой фазе. Показано, что в паровой фазе потери энергии минимальны (расхождение температур ≤ 1,6°С), тогда как в линии возврата происходит снижение на 25–30%. Полученные данные позволили обосновать выбор материалов конструкции и ее толщины в соответствии с температурными диапазонами и пределом прочности и коэффициентом запаса. Практическая значимость заключается в снижении энергозатрат за счет аккумулирования тепла с фазовыми переходами, что особенно актуально для регионов с резкими перепадами температур.

Ключевые слова: тепловой накопитель энергии, теплоаккумулятор, численное моделирование, SimInTech, тепловая труба, отопление тепличного хозяйства, децентрализованное энергоснабжение.

Введение. Теплицы, обеспечивающие подходящий микроклимат для сельскохозяйственных культур, считаются одной из самых перспективных сельскохозяйственных технологий, удовлетворяющих спрос на различные продукты питания [1]. Экстремальные погодные условия в сезон, такие как высокая относительная влажность и очень низкие температуры, способствуют развитию болезней и приводят к снижению урожайности и качества, что влияет на конкурентоспособность продукции. В этой связи теплицы оборудуются системами отопления, как правило, с помощью традиционных источников энергии (уголь, нефть и природный газ). Поскольку стоимость такого отопления слишком высока, в последние годы большое внимание уделяется использованию альтернативных технологий и систем возобновляемой энергии для обогрева теплиц, в том числе с использованием системы аккумулирования тепловой энергии [2]. Идея такой системы заключается в хранении излишков тепла в аккумуляторе, а затем в подаче такого накопленного тепла, например, во внутреннюю часть теплицы, когда это необходимо. Так, например, система обогрева теплиц на основе высокотемпературного накопителя энергии функционирует за счет циркуляции теплоносителя, который перемещается по замкнутому контуру. Теплоноситель нагревается в накопителе и передает тепло через теплообменник в систему тепловой трубы, обеспечивая фазовый переход теплоносителя и последующую передачу тепла в теплицу [3]. С развитием этой технологии для терморегулирования было изучено множество различных групп материалов [4], проведены испытания систем накопления тепла для использования в теплице [5]. В работе [6] предложили материалы с фазовым переходом для повышения эффективности преобразования водяного теплоаккумулятора. В работе [7] определили энергетические эффекты и время, в течение которого тепло из исследуемого аккумулятора покрывало потребность в тепле теплицы. Проблема материалов с фазовым переходом заключается в том, что они могут функционировать только в фиксированном диапазоне температур, при этом изменение этого диапазона температур означает изменение материалов [8].

Таким образом, повышенное внимание при создании систем обогрева тепличных хозяйств уделяется не только оптимизации параметров теплопередачи, но и внедрению методов аккумулирования тепла, обеспечивающих стабильность терморежима в условиях переменных нагрузок и ограниченных энергетических ресурсов [9]. Авторами ранее [10] была предложена конструкция высокотемпературного теплового накопителя энергии, который можно использовать для отопления теплиц или иных объектов агропромышленного сектора [11]. Он представляет собой компактное цилиндрическое устройство с многослойной теплоизоляцией и графитовым сыпучим наполнителем в качестве аккумулирующей среды, нагреваемой жидкометаллическим теплоносителем, циркулирующим по осевой трубной системе из тугоплавкого вольфрама. Графитовый наполнитель за счет высоких рабочих температур

(до 2000°С) обеспечивает существенный запас тепловой энергии. Система теплоизоляции представляет собой совокупность тонких вольфрамовых экранов, отражающих значительную часть инфракрасного излучения, и внешний слой из минеральной ваты, который обладает достаточной термостойкостью и при этом позволяет существенно снизить теплопотери при приемлемой себестоимости установки. В устройстве воздух заменен аргоном, что предотвращает окисление графита и вольфрама [2].

Для эффективной отдачи сохраненного тепла от теплового накопителя энергии во внешнем контуре применяется классическая схема парообразования и конденсации, реализуемая с помощью тепловых труб. При пропускании через теплообменный блок, расположенный в непосредственной близости от теплового накопителя, нагретое олово передает тепловую энергию воде или другому низкотемпературному рабочему телу. Вода, нагреваясь и переходя в парообразное состояние, подается по трубопроводам в грунтовую или воздушную зону обогрева теплицы, поддерживая там необходимые микроклиматические параметры. Охлажденные пары конденсируются и вновь возвращаются в теплообменник, замыкая цикл. Такая организация отопления гарантирует стабильность температурного фона внутри теплицы даже при переменных или прерывистых режимах основного энергопитания, поскольку накопитель способен длительное время сохранять и постепенно отдавать запасенную теплоту. Представленный подход обеспечивает комплексное решение сразу двух важных задач: поддержание требуемого температурного режима внутри аграрных объектов и рациональное использование доступной энергии, в частности, из возобновляемых источников.

Актуальной задачей является разработка методики расчета циркуляции теплоносителя в замкнутой системе с фазовыми переходами, определение предельных значений давления и температуры пара, что позволит подбирать оптимальные материалы для изготовления стенок баков и трубопроводов с учетом предельных термомеханических нагрузок.

Целью работы является численное моделирование процесса циркуляции теплоносителя с фазовым переходом в замкнутой системе, имитирующей работу тепловой трубы, расположенной в грунте и предназначенной для обогрева тепличного хозяйства. Для достижения поставленной цели в работе решались две основных задачи: 1. Определить температурное распределение в трубной системе при различных условиях теплоподвода и теплоотвода; 2. Исследовать динамику изменения давления в объеме жидкости и пара при протекании фазовых переходов.

Условия, материалы и методы. Для достижения цели используется программный комплекс SimInTech, обеспечивающий моделирование переходных и установившихся режимов теплогидравлических процессов с учетом фазовых переходов и нелинейных зависимостей. Преимуществами платформы являются гибкость настройки параметров, возможность работы в трехмерной и нестационарной постановке. Разработанная модель основана на уравнениях сохранения массы, импульса, энергии, тепломассообмена и термодинамических уравнениях состояния.

Объектом исследования является замкнутая трубная система с естественной циркуляцией теплоносителя, предназначенная для обогрева грунта тепличного хозяйства.

Предметом исследования выступает теплогидродинамический процесс циркуляции водяного теплоносителя с фазовыми переходами (испарением и конденсацией), протекающий в данной системе.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема исследуемой системы. В ее основе лежит бак-испаритель 4 объемом 3 м^3 с внутренним диаметром 1,5 м, в начальный момент времени, заполненный водой с объемной долей 0,5. Начальная температура жидкости (воды) t_0 принималась равной 20°С, давление в системе составляло $p_0 = 10^5$ Па. Подвод тепла к баку с водой 4 осуществлялся через теплообменную стенку 3 теплообменника из стали толщиной 1 мм. На внешней поверхности этой стенки задавались граничные условия в виде коэффициента теплоотдачи $\alpha_1 = 100$ Вт/(м2·°С) и переменной температуры t_1 в диапазоне от 150 до 200°С.

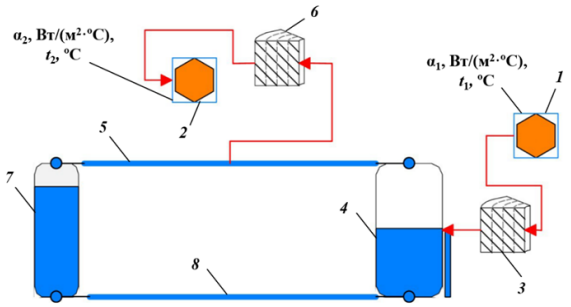


Рис. 1 – Расчетная схема замкнутой системы циркуляции теплоносителя с фазовым переходом для обогрева грунта тепличного хозяйства в SimInTech: *1*, *2* – граничные условия на входе и выходе расчетной модели (заданные температуры t_1, t_2 и коэффициенты теплоотдачи α_1, α_2); *3* – стенка теплообменника первой емкости; *4* – бак-испаритель с жидким теплоносителем; *5* – линия движения горячего пара; *6* – слой грунта, обогреваемый паром; *7* – вертикальная труба-гидрозатвор; *8* – линия возврата жидкого теплоносителя

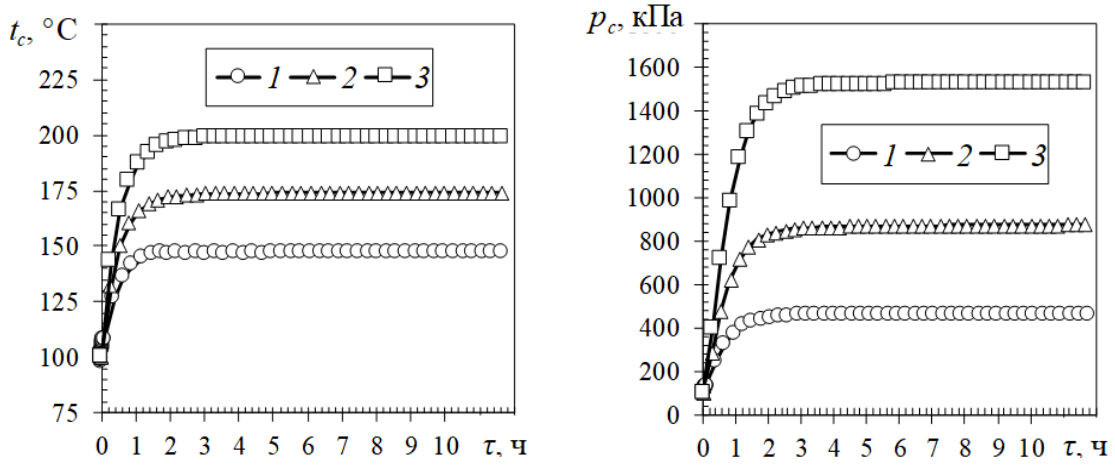
Нагретая вода в баке-испарителе 4 переходит в парообразное состояние, поднимается вверх и движется по трубе 5 с внутренним диаметром 0,1 м и длиной 10 м. В процессе движения горячий пар конденсируется, отдавая тепло грунту 6. На поверхности грунта задаются граничные условия – коэффициент теплоотдачи α_2 = 2 Вт/(м^{2}·°С) и температура среды t_2 = 20°С. В результате конденсации пар переходит в жидкое состояние и направляется в вертикальную трубу-гидрозатвор 7 с внутренним диаметром 0,1 м и объемом 0,013 м^3, первоначально заполненную жидкостью до объема 0,0065 м^3. Труба-гидрозатвор 7 выполняет функцию жидкостного барьера, предотвращающего прямой прорыв пара в обратную ветвь и обеспечивающего корректное возвратное движение конденсата. Далее жидкость возвращается по нижней трубе 8 с гидравлическим диаметром 0,05 м и длиной 10 м обратно в бак-испаритель 4. Для упрощения модели теплообмен стенок труб 7, 8 с грунтом считался адиабатическим, что оправдано относительно малыми теплопотерями.

В расчетах реализована смешанный подход нулевого уровня в одномерной постановке модели. Объем бака-испарителя 4 описывался 0D-моделью без пространственной дискретизации, тогда как трубопроводные участки 5 и 8 рассматривались как нестационарные одномерные элементы с распределенными параметрами вдоль оси потока. Каждый линейный участок трубопровода длиной 10 м дискретизировался на 20 расчетных сегментов (контрольных объемов), в результате чего в трубопроводной части контура формировалось 40 контрольных объемов рабочей среды. Для каждого контрольного объема в программном комплексе SimInTech записывались уравнения сохранения массы, импульса и энергии с учетом фазового перехода вода–пар, теплообмена через стенки и взаимодействия с грунтом. Термодинамические свойства задавались по уравнениям состояния воды и водяного пара. После пространственной дискретизации полученная система уравнений интегрировалась во времени встроенными численными методами на основе подхода, эквивалентного методу конечных объемов, с автоматическим выбором шага по времени до достижения заданного критерия сходимости по невязкам. Специальные методы статистической обработки данных не применялись; характеристики квазистационарного режима определялись по временным зависимостям температур и давлений, усредненных по времени на заключительном участке расчетного интервала.

Результаты и обсуждение. Численное моделирование и зависимости получены при помощи SimInTech. На основе полученных в результате расчета средствами SimInTech данных построены зависимости изменения значений температуры и давления рабочей среды при разных условиях эксплуатации. Численное моделирование позволило установить динамику изменения температуры и давления в разных элементах замкнутой трубной системы с учетом фазовых переходов – в баке-испарителе с жидким теплоносителем (рис. 2), в горизонтальном участке трубопровода движения пара (рис. 3) и в линии возврата жидкого теплоносителя (рис. 4). Для анализа изменений температуры и давления вдоль элементов системы расчетные данные усреднялись по объемам соответствующих участков – бака-испарителя, паровой линии и возвратного трубопровода. На каждом из участков трубопровода наблюдается схожая закономерность, что после фазы интенсивного изменения параметров происходит выход системы на установившееся состояние. Переход от нестационарного к квазистационарному режиму происходит в среднем за первые 1,2–5,2 часа расчетного времени, в зависимости от заданной температуры нагрева теплообменной поверхности бака-испарителя t_1 от 150 до 200°С (рис. 1). При более высоких температурах t_1 выход на квазистационарный режим ускоряется – осредненные значения τ = 2,2 (t_1 = 150°С), 2,01 (175°С), 4,32 (200°С) ч. Это объясняется более интенсивным теплоподводом и, как следствие, ускоренным процессом парообразования и распространения тепловой энергии по всей системе.

На всех участках трубной системы наблюдается выраженная согласованность термодинамических параметров. Значения температуры и давления в зоне паровой фазы, охватывающей бак-испаритель и горизонтальный участок трубопровода транспортировки пара, практически совпадают, что указывает на незначительные гидравлические и тепловые потери при перемещении рабочего тела в парообразном состоянии. Такое поведение подтверждает эффективность передачи энергии в паровой фазе и свидетельствует о низком сопротивлении потоку в данной части системы. В отличие от этого, в обратной линии, по которой жидкий теплоноситель возвращается после конденсации, фиксируется более медленное возрастание температуры. Это обусловлено инерционным характером теплопередачи в жидкой фазе.

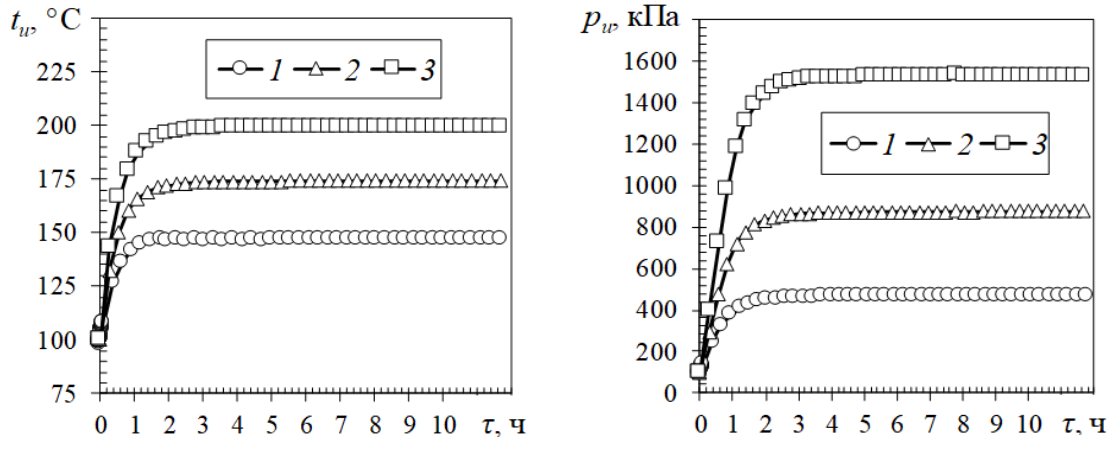
На рисунках 2 представлены зависимости изменения температуры и давления в баке-испарителе во времени. На этапе начального прогрева, продолжительностью до 1,48–3 ч, происходит резкое повышение как температуры, так и давления, из-за быстрого перехода жидкости в пар при интенсивном теплоподводе. Температура в баке достигает квазистационарного значения t_c при температуре теплообменной поверхности t_1 t_c = 146,3 (t_1 = 150°С), 173,06 (t_1 = 175°С) и 198,04 (t_1 = 200°С) °С (рис. 2, а), давление рс стабилизируется при значениях 455,9, 830,3, 1491,4 кПа (рис. 2, б) соответственно. Рост температуры теплообменной поверхности приводит к кратному увеличению давления в баке, что подтверждает прямую зависимость между температурой насыщенного пара и его давлением согласно уравнению состояния.



а) *б)*

Рис. 2 – Динамика изменения температуры t_c (*а*) и давления p_c (*б*) в рабочей среде бака-испарителя (рис. 1, позиция *4*) во времени τ при температуре теплообменной поверхности t_1, °С: *1* – 150; *2* – 175; *3* – 200

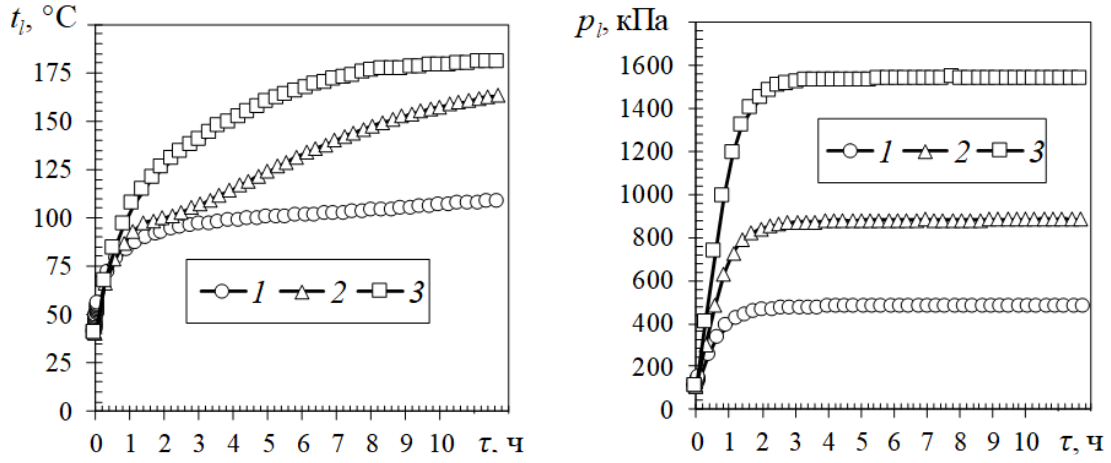
Рисунок 3 отражает изменение температуры t_u и давления p_u в верхней линии трубопровода, по которой пар из бака-испарителя, поступает к зоне теплопередачи в грунт теплицы. При температуре теплообменной поверхности t_1 температура в рабочей среде в горизонтальном участке трубопровода движения пара достигает квазистационарного значения t_u = 144,65 (t_1 = 150°С), 169,16 (t_1 = 175°С) и 198,4 (t_1 = 200°С) °С (рис. 3, а), давление p_u стабилизируется при 450,6, 858,1, 1503,5 кПа (рис. 3, б) соответственно. Расхождение между значениями давления в баке-испарителе (рис. 2) и в паровой линии (рис. 3) составляет менее 3%, что подтверждает отсутствие значимых гидравлических сопротивлений и потерь энергии при движении пара. Полученные значения давления и температуры свидетельствуют о том, что при заданных условиях теплоподвода данная часть системы не требует дополнительной интенсификации процесса циркуляции и способна работать устойчиво как в переходных, так и в стационарных режимах.



а) *б)*

Рис. 3 – Динамика изменения температуры t_u (*а*) и давления p_u (*б*) в рабочей среде в горизонтальном участке трубопровода движения пара (рис. 1, позиция *5*) в процессе времени τ при температуре теплообменной поверхности t_1, °С: *1* – 150; *2* – 175; *3* – 200

На рисунке 4 представлена динамика изменения температуры t_l и давления p_l в нижней линии возврата жидкого теплоносителя в бак-испаритель. Основной особенностью рассматриваемого участка является наличие жидкой фазы в условиях, приближенных к насыщению, что определяет специфическую теплогидродинамическую картину, отличающуюся от двух предыдущих участков с преобладанием паровых потоков. На начальном этапе моделирования (первые 1–3 часа) происходит постепенное повышение температуры жидкости в виду теплового взаимодействия жидкости с остаточным теплом пара и поступлением тепла от конденсата, двигающегося из более теплой зоны. В отличие от резкого температурного роста в баке (рис. 2, а) и в паровой линии (рис. 3, а), здесь температурная кривая носит сглаженный характер (рис. 4, а), указывая на более инерционную тепловую реакцию системы.



а) *б)*

Рис. 4 – Динамика изменения температуры t_l (*а*) и давления p_l (*б*) в рабочей среде в линии возврата жидкого теплоносителя (рис. 1, позиция *8*) в процессе времени τ при температуре теплообменной поверхности t_1, °С: *1* – 150; *2* – 175; *3* – 200

Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенной системы с естественной циркуляцией и фазовыми переходами. Установлено, что при разных температурах теплоподвода система в течение 1,2–5,2 часа достигает квазистационарного режима, при котором значения температуры и давления в каждом из элементов стабилизируются на уровнях, соответствующих термодинамическим расчетам и физическим характеристикам насыщенного пара и жидкости. Это обеспечивает возможность проведения обоснованных инженерных расчетов на прочность и термостойкость конструкции, позволяя адаптировать систему под конкретные климатические и эксплуатационные условия. Применение программного комплекса SimInTech позволило не только учесть динамику фазовых переходов, но и получить достоверные и воспроизводимые результаты, подтверждающие физическую состоятельность модели. Разработанный подход может быть использован как инструмент для проектирования энергоэффективных аграрных установок, работающих на принципах тепловых труб, что приобретает особую значимость в условиях децентрализованного и автономного энергоснабжения.

Для количественной оценки устойчивости установившегося режима по последним 10% временных шагов расчета были вычислены средние значения и стандартные отклонения термодинамических параметров. При t_1 = 200°С среднее давление в баке 1491,4 кПа с отклонением ±3,2 кПа, в паровой линии 1503,5 кПа с отклонением ±4,1 кПа. Температуры проявили еще меньшую вариативность (< 0,5°С), что указывает на высокую воспроизводимость модели.

Выводы. В результате проведенного исследования была достигнута цель оценки параметров теплоносителя при его циркуляции по замкнутой системе теплоснабжения с использованием разработанного теплового накопителя энергии с фазовыми переходами. Использование моделирования в среде SimInTech позволило детально изучить распределение температур и давления во времени в разных элементах замкнутой трубной системы при различных условиях эксплуатации.

В результате численного моделирования процесса циркуляции водяного теплоносителя с фазовыми переходами в замкнутом контуре обогрева теплиц получены следующие конкретные значения установившихся параметров для трех режимов внешнего нагрева бака-испарителя. При температуре теплообменной поверхности t_1 = 150°С время выхода на квазистационарный режим составляет 2,2 часа. Температура в баке-испарителе: 146,3°С, в паровой линии: 144,7°С, в линии возврата: 99,2°С. Давление в баке 455,9 кПа, в паровой линии 450,6 кПа, в линии возврата 467,2 кПа.

При t_1 =175°С время стабилизации 2,01 часа, температура в баке 173,1°С, в линии пара 169,2°С, в линии возврата 150,6°С. Давление в баке 830,3 кПа, в паровой линии 858,1 кПа, в линии возврата 860,2 кПа. Соответственно при t_1 = 200°С температуры 198°С / 198,4°С / 161,4°С, а давления 1491,4 кПа / 1503,5 кПа / 1443,9 кПа. Время стабилизации 4,32 часа.

На основании полученных данных можно сделать вывод о целесообразности применения различных конструкционных материалов в зависимости от температурных условий. При температуре ниже 175°С и давлении не более 0,86 МПа возможно использование углеродистых сталей, например, таких как Ст20 или 09Г2С. При этом необходимо провести соответствующий расчет толщины стенок.

При температуре 200°С и давлении около 1,5 МПа целесообразно применять нержавеющие стали, например, марки 12Х18Н10Т, или легированные стали, такие как 15Х1М1Ф. Указанные материалы должны обеспечивать предел прочности не менее 25 МПа при температуре до 250°С с коэффициентом запаса прочности не менее 1,5.

Для оптимизации геометрии системы и

ускорения стабилизации при высоких температурах рекомендуется минимизировать гидравлическое сопротивление возвратного контура. Этого можно достичь, например, путем использования гладких труб с антикоррозийным покрытием.

Стоит подчеркнуть, что высокие температуры и давления, о которых идет речь, приведены для демонстрации расчетной модели и иллюстрации влияния параметров. На практике использовать такие условия не рекомендуется из-за высокой стоимости системы, сложности ее обслуживания и обеспечения безопасности.

Сопоставление полученных зависимостей с результатами других исследований по обогреву тепличных хозяйств показывает, что характерные масштабы тепловой инерции и достигаемые температурные уровни находятся в том же порядке величин. В работе по исследованию теплицы с прозрачными ограждениями на основе материалов с фазовым переходом отмечается положительный эффект интеграции материалов с фазовым переходом, что позволило увеличить среднюю температуру воздуха в теплице на несколько градусов и существенно сгладить суточные колебания температуры и освещенности, формируя более однородный микроклимат для растений. Вместе с тем в ходе анализа не выявлено работ, в которых средствами SimInTech подробно моделировалась бы нестационарная циркуляция двухфазного теплоносителя с фазовыми переходами в замкнутом контуре типа «бак-испаритель – тепловая труба – грунтовый теплообменник теплицы». На этом фоне представленную модель можно рассматривать как одно из первых детальных исследований такого рода, расширяющее область применения отечественного программного комплекса SimInTech к задачам агроэнергетики и высокотемпературного аккумулирования энергии.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

1. Смирнов П.А., Тихонова А.В. Опытно-аналитическое определение критических температурных точек теплицы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 4 (68). С. 98–105. doi: 10.12737/2073-0462-2023-98-105.

2. Photothermal performance of plastic greenhouse embedded with phase change materials in translucent envelopes: A dynamic experimental study / R. Yang, D. Li, M. Arıcı [et al.] // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 58. Article 106375. doi: 10.1016/j.est.2022.106375.

3. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии / А. В. Бараненко, П. А. Кузнецов, В. Ю. Захарова и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 990–1000. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000.

4. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review / H. Nazir, M. Batool, F. J. B. Osorio [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 129. P. 491–523. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.

5. Study on a novel water heat accumulator below the north roof in Chinese solar greenhouse: System design / X. Wan, T. Xia, Y. Li [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 234. Article 121316. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121316.

6. New insights of designing thermal insulation and heat storage of Chinese solar greenhouse in high latitudes and cold regions / L. Xingan, W. Xiaoyang, X. Tianyang [et al.] // Energy. 2021. Vol. 242. Article 122953. doi: 10.1016/j.energy.2021.122953.

7. Benli H., Durmuş A. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating // Solar Energy. 2009. Vol. 83. Issue 12. P. 2109–2119. doi: 10.1016/j.solener.2009.07.005.

8. Research progress and performance improvement of phase change heat accumulators / C. Wang, S. Wang, X. Cheng [et al.] // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 56. Part A. Article 105884. doi: 10.1016/j.est.2022.105884.

9. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of Thermal Storage Technologies in Energy Sector // IEEE Xplore. 2020. P. 68–71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236.

10. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке / А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 4. С. 73–85. doi: 10.14529/power240409.

11. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом / А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 6. С. 166–179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

Сведения об авторах:

Зинуров Вадим Эдуардович – кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой инженерной графики, e-mail: vadd_93@mail.ru

Уткин Максим Олегович – аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств, e-mail: 209maks@mail.ru

Дмитриев Андрей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, e-mail: ieremiada@gmail.com

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия.

Халиуллин Дамир Тагирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и

оборудования в агробизнесе, e-mail: damirtag@mail.ru
Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.
Дмитриева Оксана Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования пищевых производств, e-mail: ja_deva@mail.ru
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.

MODELING THE CIRCULATION OF A PHASE-CHANGE HEATTRANSFER FLUID IN A CLOSED-LOOP GREENHOUSE HEATING SYSTEM BASED ON A HIGH-TEMPERATURE ENERGY STORAGE SYSTEM

V. E. Zinurov, M. O. Utkin, A. V. Dmitriev, D. T. Khaliullin, O. S. Dmitrieva

Abstract. This article presents numerical modeling of a closed-loop heating system for greenhouse heating based on a phase-change heat pipe using a water coolant. The aim of the study is to analyze the thermodynamic parameters in a transient mode, focusing on the stabilization time and temperature and pressure distribution during heating of the evaporator tank. The mathematical model is implemented in SimInTech software package. The evaporator tank was considered as a concentrated volume with uniform parameters (zero-dimensional model), and the pipelines were considered as a sequence of one-dimensional sections in which temperature and pressure varied along their length. Each section was divided into segments, for which the equations for conservation of mass, momentum and energy were solved, taking into account the water-steam phase transition and heat exchange with the ground. It was found that, under the considered natural circulation conditions, the system reaches a quasi-steady state within several hours (approximately 2.2-4.3 hours), while the vapor pressure in the circuit increases from approximately 450 to 1500 kPa with an increase in the heating temperature from 150 to 200°C. The temperatures and pressures in the evaporator tank and the steam line are virtually identical (the temperature difference does not exceed 1.5-2°C), indicating low energy losses during heat transfer in the vapor phase. Energy losses in the vapor phase were shown to be minimal (temperature difference ≤ 1.6°C), while in the return line, they were reduced by 25–30%. The obtained data allowed us to justify the selection of structural materials and thicknesses in accordance with temperature ranges, tensile strength, and safety factors. The practical significance lies in the reduction of energy costs due to heat accumulation with phase transitions, which is especially relevant for regions with sharp temperature fluctuations.

Key words: thermal energy storage, heat accumulator, numerical modeling, SimInTech, heat pipe, greenhouse heating, decentralized energy supply.

References

1. Smirnov PA, Tikhonova AV. [Experimental and analytical determination of critical temperature points of a greenhouse]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 4 (68). 98-105 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-98-105.

2. Yang R, Li D, Arici M. Photothermal performance of plastic greenhouse embedded with phase change materials in translucent envelopes: A dynamic experimental study. Journal of Energy Storage. 2023; Vol.58. Article 106375. doi: 10.1016/j.est.2022.106375.

3. Baranenko AV, Kuznetsov PA, Zakharova VYu. [Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki. 2018; Vol.18. 6. 990-1000 p. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000.

4. Nazir H, Batool M, Osorio FJB. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: a review. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019; Vol.129. 491-523 p. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.

5. Wan X, Xia T, Li Y. Study on a novel water heat accumulator below the north roof in Chinese solar greenhouse: system design. Applied Thermal Engineering. 2023; Vol.234. Article 121316. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121316.

6. Xingan L, Xiaoyang W, Tianyang X. New insights of designing thermal insulation and heat storage of Chinese solar greenhouse in high latitudes and cold regions. Energy. 2021; Vol.242. Article 122953. doi: 10.1016/j.energy.2021.122953.

7. Benli H, Durmuş A. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating. Solar Energy. 2009; Vol.83. Issue 12. 2109-2119 p. doi: 10.1016/j.solener.2009.07.005.

8. Wang C, Wang S, Cheng X. Research progress and performance improvement of phase change heat accumulators. Journal of Energy Storage. 2022; Vol.56. Part A. Article 105884. doi: 10.1016/j.est.2022.105884.

9. Zinurov V, Nikandrova M, Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. IEEE Xplore. 2020; 68-71 p. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236.

10. Chadaev AN, Dmitriev AV, Zinurov VE. [Evaluation of the energy transfer process in a thermal storage device with a high-temperature working fluid during its discharge]. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. 2024; Vol.24. 4. 73-85 p. doi: 10.14529/power240409.

11. Chadaev AN, Dmitriev AV, Zinurov VE. [Algorithm for calculating a multilayer thermal insulation system for a heat storage device with a high-temperature working fluid]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2024; Vol.26. 6. 166-179 p. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

Authors:
Zinurov Vadim Eduardovich – Ph.D. of Technical Sciences, acting head of Engineering Graphics Department, e-mail: vadd_93@mail.ru
Utkin Maksim Olegovich – post-graduate student of Department of Technological Processes and Production Automation, e-mail: 209maks@mail.ru
Dmitriev Andrey Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Technological Processes and Production Automation, e-mail: ieremiada@gmail.com
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Khaliullin Damir Tagirovich– Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, e-mail: damirtag@mail.ru
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.
Dmitrieva Oksana Sergeevna – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Food Production Equipment, e-mail: ja_deva@mail.ru
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-100-106
УДК 621.313.1

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Т. И. Петров

Реферат. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и надежности электроприводов, применяемых в сельскохозяйственной технике, эксплуатируемой в экстремальных условиях: высокая запыленность, нестабильные нагрузки, сезонность работы и ограниченное охлаждение. Для проектирования электродвигателей, устойчивых к данным факторам, автором модернизирован метод топологической оптимизации, ранее апробированный на маломощном электротранспорте. В статье рассматриваются особенности применения топологической оптимизации синхронных двигателей с постоянными магнитами для сельскохозяйственной техники с учетом специфики эксплуатационных условий, включая повышенную запыленность, нестабильные нагрузки и ограниченные возможности охлаждения. И предложена многокритериальная целевая функция, интегрирующая ключевые эксплуатационные параметры синхронных двигателей с постоянными магнитами: массу активных материалов (весовой коэффициент 0,25), электромагнитные потери (0,35), максимальную температуру (0,25) и пульсации магнитной индукции (0,15). Начальная конфигурация двигателя (масса 50 кг, потери 1200 Вт, температура 110°C, пульсации 20 мТл) оптимизирована с применением генетического алгоритма. На основе оценочного расчета за 10 итераций достигнуто снижение целевой функции с 0,944 до 0,788 при одновременном улучшении всех параметров: масса уменьшена на 11%, потери — на 27,7%, температура — на 13,6%, пульсации — на 26%. Представлен график изменения целевой функции, таблицы параметров по итерациям, рассчитано поле магнитной индукции. Очевидно, что при практической реализации эффективность решения снизится, но даже предварительные результаты подтверждают, что топологическая оптимизация позволяет адаптировать конструкцию двигателя к специфике сельхозтехники, обеспечивая снижение массы, рост энергоэффективности и повышение ресурса в условиях многофакторных воздействий. Разработанный подход устраняет традиционные компромиссы между массой, потерями и тепловым режимом, предлагая комплексное решение для устойчивой работы электроприводов в агропромышленном секторе.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, электрическая машина, синхронный двигатель, моделирование, генетический алгоритм.

Введение. Современное сельское хозяйство предъявляет высокие требования к энергетическому оборудованию, используемому в аграрной технике. Нестабильные нагрузки, повышенная запыленность, температурные колебания и ограниченные возможности охлаждения создают сложные условия эксплуатации, требующие надежных и эффективных решений. В этом контексте синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) становятся перспективным выбором благодаря высокой плотности мощности и энергоэффективности.

Однако внедрение СДПМ в сельскохозяйственную технику сопряжено с рядом вызовов. Традиционные методы проектирования не всегда обеспечивают оптимальные характеристики в условиях аграрной среды. Топологическая оптимизация, учитывающая геометрию и распределение материалов, предлагает эффективный подход к улучшению характеристик СДПМ. Исследования показывают, что применение топологической оптимизации позволяет снизить массу активных материалов, потери и пульсации магнитной индукции, а также контролировать температурные режимы работы двигателя.

Анализ современных публикаций показывает значительный интерес научного сообщества к проблемам оптимизации электродвигателей специального назначения. В работах последних лет особое внимание уделяется синхронным двигателям с постоянными магнитами.

Исследования [1] продемонстрировали эффективность применения методов топологической оптимизации для снижения массы ротора без ущерба для электромагнитных характеристик. Авторы особо подчеркивают важность учета нелинейных свойств магнитных материалов при численном моделировании. В развитие этих идей, работы [2] предложили модифицированный алгоритм оптимизации, учитывающий температурные деформации элементов конструкции.

Специфике эксплуатации сельскохозяйственных двигателей посвящены исследования группы европейских ученых [3]. Их работы содержат детальный анализ влияния абразивных частиц и повышенной влажности на ресурс электрических машин. Особый интерес представляет разработанная ими методика учета внешних загрязнений при проектировании систем охлаждения.

Автор данного исследования также активно работает в области разработок методов многокритериальной оптимизации [4, 5], предложив подход к оптимизации последовательно электромагнитных, тепловых и механических характеристик. Результаты показывают возможность одновременного улучшения нескольких ключевых параметров двигателя.

В контексте производственных технологий следует отметить работу [6], где подробно анализируются ограничения, накладываемые современными методами обработки материалов на геометрию оптимизированных конструкций. Авторы предлагают практические рекомендации по адаптации проектных решений к возможностям аддитивного производства.

Перспективным направлением, по данным последних публикаций [7], является интеграция методов машинного обучения в процесс топологической оптимизации. Это позволяет существенно сократить вычислительные затраты при сохранении точности расчетов.

Особого внимания заслуживают исследования, посвященные долговечности оптимизированных конструкций [8]. Полученные ими данные о циклической усталости материалов в условиях вибрационных нагрузок имеют важное значение для сельскохозяйственных применений.

Современный этап развития этого научного направления характеризуется переходом от чисто теоретических исследований к практической реализации. Об этом свидетельствуют публикации, описывающие успешные случаи внедрения оптимизированных двигателей в серийное производство [9,10].

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о наличии значительного потенциала для дальнейшего совершенствования методов топологической оптимизации электродвигателей, особенно в части учета реальных условий эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Таким образом цель работы модернизировать методику топологической оптимизации конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами, предназначенного для применения в сельскохозяйственной технике, с целью комплексного повышения его энергетической эффективности, надёжности и производственной экономичности за счёт одновременного снижения массы, потерь, максимальной рабочей температуры и пульсаций магнитной индукции, с учётом условий эксплуатации в аграрной среде (запылённость, температурные колебания, переменные нагрузки).

Автором предлагается изменить подход, разработанный ранее [4, 5], под вышеописанные требования. Для этого необходимо перейти от итерационного расчета электромагнитных, тепловых и прочностных параметров к многокритериальной целевой функции, и на её основе провести предварительную топологическую оптимизацию с целью определения перспектив использования данного метода.

Условия, материалы и методы. Применение топологической оптимизации к синхронным двигателям с постоянными магнитами, предназначенным для сельскохозяйственной техники, требует учета ряда специфических факторов. Эксплуатация в условиях повышенной запыленности, значительных вибрационных нагрузок, температурных колебаний и ограниченного теплоотвода предъявляет особые требования к конструкции.

Ключевым аспектом является обеспечение механической надежности оптимизированной конструкции. Геометрическое распределение материала должно гарантировать достаточную жесткость и прочность для противодействия ударным и вибрационным воздействиям, характерным для полевых условий. Не менее важна тепловая стабильность - оптимальное распределение активных материалов должно способствовать эффективному теплоотведению при отсутствии принудительного охлаждения.

Современные исследования демонстрируют преимущества комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь электромагнитных, тепловых и механических характеристик. Такой мультифизичный анализ особенно важен для сельскохозяйственных применений, где требуется одновременная оптимизация по нескольким критериям.

Особое внимание следует уделить технологичности производства оптимизированных конструкций. Полученные геометрические решения должны быть реализуемы с использованием промышленных технологий - литья, штамповки или аддитивного производства. При этом необходимо соблюдать баланс между снижением массы конструкции и сохранением ее эксплуатационных характеристик.

Для количественной оценки эффективности предложена многокритериальная целевая функция, интегрирующая четыре ключевых параметра: массу активных материалов, уровень электромагнитных потерь, максимальную рабочую температуру и амплитуду пульсаций магнитной индукции. Такой подход позволяет получить конструктивное решение, оптимально адаптированное к жестким условиям сельскохозяйственной эксплуатации, характеризующимся экстремальными температурными режимами, запыленной средой и переменными нагрузками.

Использована нормированная модель:

$$F = w_1 \cdot \frac{M}{M_0} + w_2 \cdot \frac{P_{loss}}{P_{loss,0}} + w_3 \cdot \frac{T_{max}}{P_{max,0}} w_4 \cdot \frac{\Delta B}{\Delta B_0} \quad (1)$$

где F – итоговая нормированная целевая функция; M – масса активных материалов двигателя; P_{loss} – электромагнитные потери; T_{max} – максимальная температура; ΔB – амплитуда пульсаций магнитной индукции (характеризует пульсации момента); M_0, $P_{loss,0}$, $T_{max,0}$, ΔB_0 – соответствующие значения исходного прототипа (до оптимизации), используемые для нормализации; w_1,w_2,w_3,w_4 – весовые коэффициенты (зависит от приоритета в задаче, используемые в статье представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1 — Пример весов для сельскохозяйственной техники

Критерий	Вес w_i	Обоснование
Масса двигателя	$w_1 = 0.25$	Снижение нагрузки на шасси и потребление
Потери	$w_2 = 0.35$	Повышение КПД и уменьшение перегрева
Температура	$w_3 = 0.25$	Повышение надежности в жарком и пыльном климате
Пульсации	$w_4 = 0.15$	Минимизация вибраций и износа

Для предварительной оценки перспектив реализации топологической оптимизации использованы стандартные параметры СДПМ, которые используются в качестве исходных данных для расчета прототипа (табл. 2).

Предварительная топологическая оптимизация производилась по уже описанной методике [4, 5], с заменой итерационных расчетов на расчет целевой функции.

Для моделирования использовался программный комплекс Elcut в 2D моделировании с адаптивной треугольной сеткой (средний размер элемента 1,2 мм, с изменениями в зоне магнитов до 0,4 мм). В качестве магнитопроводного материала использовалась сталь М400-50А (B-H кривая импортирована из открытых источников), магниты выбраны из феррита Y35 с остаточной индукцией 0,38 Тл.

Таблица 2 — Значения параметров исходного прототипа

Параметр	Обозначение	Значение
Масса	M_0	50 кг
Потери	$P_{loss,0}$	1200 Вт
Максимальная температура	$T_{max,0}$	110 °C
Пульсации	ΔB_0	20 мТл

Параметры работы генетического алгоритма: размер популяции 40, вероятность кроссовера 0,8, вероятность мутации 0,1, критерий остановки – отсутствие улучшения целевой функции более чем на 0,5% в течение 20 поколений или достижение 150 поколений. Алгоритм реализован на Python с использованием библиотеки DEAP.

Для каждой итерации рассчитывались: масса активных материалов, электромагнитные потери, максимальная температура (через сопряжённый тепловой анализ), пульсации магнитной индукции. Все параметры нормировались относительно исходной модели по формуле (1).

Для повышения достоверности численного эксперимента была проведена оценка статистической воспроизводимости результатов. Оптимизация выполнялась пять раз с разными начальными популяциями генетического алгоритма, что позволило определить устойчивость сходимости и разброс решения. Среднеквадратичное отклонение итогового значения целевой функции составило ±0,012, что соответствует коэффициенту вариации менее 1,5% и указывает на стабильность процесса оптимизации. Для каждого расчёта использовалась адаптивная сетка с контролем погрешности: дополнительно проведено сравнение результатов на основной и утончённой сетке, расхождение не превысило 1,6% по массе, потерям, температуре и пульсациям магнитной индукции. Проведён анализ чувствительности модели к изменению коэффициента теплоотдачи: при варьировании параметра в диапазоне ±10% температура изменялась не более чем на 3%, что подтверждает устойчивость полученных результатов к влиянию эксплуатационных факторов.

Результаты и обсуждение. Оценочный анализ проведённой предварительной оптимизации конструкции синхронного двигателя для сельскохозяйственной техники показал, что топологический подход позволяет достичь сбалансированного улучшения по нескольким критериям одновременно: снижение массы, уменьшение электромагнитных потерь, понижение максимальной температуры и снижение пульсаций магнитной индукции. Это особенно актуально для условий, характерных для аграрной среды – высокой запылённости, вибраций, колебаний нагрузки и ограниченного охлаждения.

Таблица 3 — Значения результатов оптимизации при 10 итерациях

Итерация	Масса M (кг)	Потери P_{loss} (Вт)	Температура T_{max} (°C)	Пульсации ΔB (мТл)	Целевая функция F
1	48.00	1150	108	19	0.944
2	47.47	1122	106.5	18.56	0.926
3	46.93	1094	105	18.11	0.909
4	46.40	1066	103.5	17.67	0.891
5	45.87	1038	102	17.22	0.874
6	45.33	1010	100.5	16.78	0.856
7	44.80	982	99	16.33	0.839
8	44.27	954	97.5	15.89	0.821
9	43.73	926	96	15.44	0.804
10	43.20	900	95	15.00	0.788

В табл. 3 представлены результаты 10 итераций оптимизации, проведённой с использованием генетического алгоритма. За каждый шаг происходила адаптация формы ротора на основе многокритериальной целевой функции, объединяющей четыре нормированных параметра: массу активных материалов M, потери Ploss, температуру Tmax и пульсации магнитной индукции ΔB.

Уже к пятой итерации значение целевой функции снизилось с 0,944 до 0,874, при этом масса двигателя уменьшилась с 48 до 45,87 кг, а потери – на 162 Вт. По результатам десятой итерации значение целевой функции достигло 0,788, что означает снижение на 16,5% по сравнению с первой итерацией и на 21% по сравнению с исходной моделью.

На графике (рис. 1) визуализирована динамика целевой функции – снижение носит устойчивый, практически линейный характер, что свидетельствует о стабильной сходимости оптимизационного процесса.

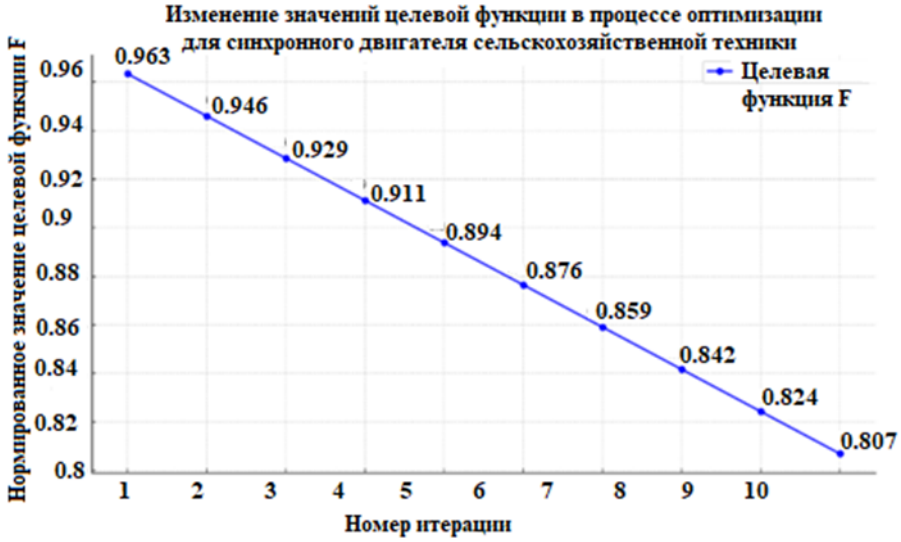


Рис. 1 – Изменение значений целевой функции в процессе оптимизации для синхронного двигателя сельскохозяйственной техники

На рисунке 2 представлено сравнительное нормированное представление всех четырёх критериев — видно, что наибольшее снижение достигнуто по потерям и пульсациям, что особенно ценно для снижения нагрева и вибрационной нагрузки.

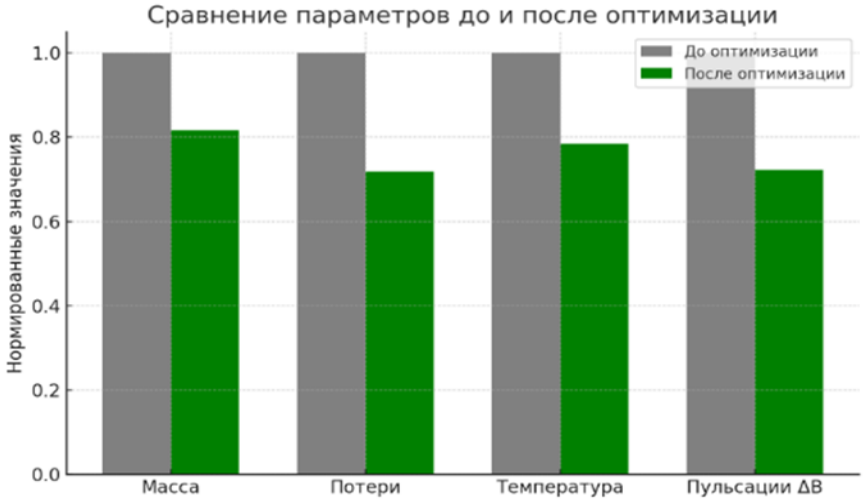


Рис. 2 – Сравнение относительных параметров 4 ключевых показателей

На тепловой карте магнитной индукции (рис. 3) видно выравнивание магнитного потока, устранение зон насыщения, что улучшает распределение тепла и снижает магнитные пульсации.

Полученное значение целевой функции 0,788 демонстрирует существенное улучшение эксплуатационных характеристик двигателя - совокупный прирост эффективности составил 17% по сравнению с базовой моделью (0,944). Следует отметить, что в данной методике оценки значения F<1 свидетельствуют о достижении оптимальной конфигурации, причем уменьшение этого показателя прямо коррелирует с повышением эффективности конструкции.

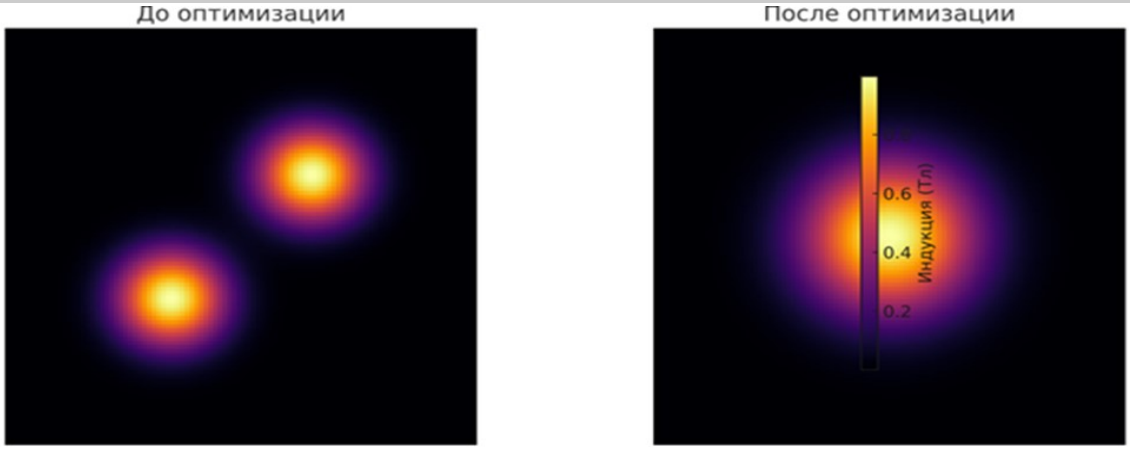


Рис. 3 – Распределение магнитной индукции

Проведенная оптимизация позволила достичь следующих качественных улучшений.

Массогабаритные характеристики двигателя улучшились на 11%, что привело к снижению инерционных нагрузок на опорные узлы сельскохозяйственного агрегата. Одновременно на 27,7% уменьшились электромагнитные потери, что непосредственно отразилось на энергоэффективности системы. Тепловой режим работы оптимизированной конструкции стал стабильнее - максимальная рабочая температура снизилась на 13,6%, что существенно повышает ресурс изоляционных материалов и предотвращает риск теплового пробоя обмоток.

Особого внимания заслуживает 26% снижение уровня пульсаций магнитной индукции. Этот показатель напрямую влияет на виброакустические характеристики привода, уменьшая паразитные механические нагрузки и износ сопряженных деталей.

Полученные результаты предварительно подтверждают эффективность примененного метода топологической оптимизации для условий эксплуатации сельскохозяйственной техники. Улучшенные характеристики двигателя особенно значимы при работе в условиях повышенной запыленности, значительных температурных колебаний и переменных нагрузок, характерных для аграрного сектора. Достигнутые показатели свидетельствуют о перспективности данного подхода для создания энергоэффективных и надежных электроприводов специального назначения.

Сопоставление полученных данных с результатами других исследований позволяет более полно оценить эффективность предложенного подхода. Достигнутое снижение массы двигателя на 11% сопровождается одновременным уменьшением электромагнитных потерь на 27,7%, что обеспечивает комплексный выигрыш по сравнению с результатами [1], где снижение массы достигалось без улучшения энергетических характеристик. Снижение максимальной рабочей температуры на 13,6% согласуется с данными [2], однако в настоящей работе дополнительно учитывались пульсации магнитной индукции, что позволило снизить их на 26%. Этот результат превосходит показатели [10], где оптимизация формы обеспечила около 15% снижения пульсаций для двигателей малой мощности. Таким образом, предложенная многокритериальная целевая функция, учитывающая одновременно массу, потери, температуру и пульсации, обеспечивает более сбалансированный результат и лучше адаптирована к условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Комплексный учёт мультифизичных процессов и эксплуатационных ограничений позволяет не только снизить энергетические потери, но и уменьшить виброакустическую нагрузку на агрегаты, что способствует увеличению ресурса привода и снижению затрат на обслуживание.

Выводы. Проведённая работа продемонстрировала значительный потенциал многокритериальной топологической оптимизации при проектировании синхронных двигателей с постоянными магнитами, предназначенных для использования в сельскохозяйственной технике. Адаптивное распределение активных материалов, включая сталь и магниты, позволило достичь существенного улучшения ключевых параметров двигателя. Нормированное значение целевой функции составило 0,788, что подтверждает комплексное преимущество предложенной конструкции по сравнению с базовым вариантом.

Для внедрения разработанного решения в производство необходимо изготовить опытный образец ротора с применением современных технологий, таких как аддитивное производство или штамповка тонколистовых заготовок с последующей лазерной резкой. Эти методы обеспечат необходимую точность при воспроизведении сложной геометрии выемок и воздушных каналов. Далее требуется провести натурные испытания двигателя в составе сельскохозяйственной техники. Испытания должны проводиться в условиях, приближенных к реальной эксплуатации: при температурах от –25°С до +40°С, повышенной запылённости и вибрационных нагрузках.

Полученные данные позволят уточнить весовые коэффициенты целевой функции с учётом влияния вибрации, влажности и абразивного износа.

Особое внимание следует уделить оценке долговременной надёжности двигателя в агрессивных условиях эксплуатации. Необходимо изучить влияние циклических температурных деформаций на магнитные материалы и стальные компоненты, чтобы гарантировать устойчивость конструкции к длительным нагрузкам.

Результаты исследования подтверждают, что применение топологически оптимизированных синхронных двигателей с постоянными магнитами в сельскохозяйственной технике способно снизить производственные затраты, повысить энергоэффективность и увеличить общую надёжность оборудования. Это открывает новые перспективы для развития энергосберегающих технологий в аграрном секторе.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

1. Allaire G., Gfrerer M. H. Autofreefem: automatic code generation with FreeFEM and LaTex output for shape and topology optimization of non-linear multi-physics problems // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2024. Vol. 67. No. 12. P. 213. doi: 10.48550/arXiv.2407.11713.

2. Babcock T., McKeever B., Hicken J. E. Electrothermal coupling methodologies and their influence on the optimization of aircraft electric motors // AIAA Journal. 2024. Vol. 62. No. 7. P. 2659–2677. doi: 10.2514/1.J063627.

3. Topology optimization for uniform flow distribution in electrolysis cells / L. Baeck, S. Blauth, C. Leith¨auser, et.al. // PAMM. 2023. Vol. 23. No. 3. P. e202300163. doi: 10.1002/pamm.202300163.

4. Petrov T., Safin A. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors. // Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of ICEPP. 2021. Vol 190. P. 151–156. doi: 10.1007/978-3-030-86047-9_16.

5. Safin A., Petrov.T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors // E3S Web Conf. 2020. Vol. 220. P. 01040. doi: 10.1051/e3sconf/202022001040.

6. Cesarano A., Dapogny C., Gangl P. Space-time shape optimization of rotating electric machines // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2024. Vol. 34. No. 14. P. 2647-2708. doi: arXiv.2402.07017.

7. Gangl P. A multi-material topology optimization algorithm based on the topological derivative // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2020. Vol. 366. P.113090. doi: 10.1016/j.cma.2020.113090.

8. Gangl P., Sturm K. Automated computation of topological derivatives with application to nonlinear elasticity and reaction–diffusion problems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2022. Vol. 398. P. 115288. doi: 10.1016/j.cma.2022.115288.

9. Automatic differentiation-based level-set topology optimization for noise minimization in 3D domains considering acoustic-structure interaction / A. Neofytou, T. Rios, M. Bujny, et.al // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2025. Vol. 68. No. 3. P. 67. doi: 10.1007/s00158-025-03995-z.

10. Kim H.-J., Baek S.-W. Optimal shape design to improve torque characteristics of interior permanent magnet synchronous motor for small electric vehicles // Microsystem Technologies. 2024. Vol. 31. P. 1203-1217. doi: 10.1007/s00542-024-05699-8.

Сведения об авторе:

Петров Тимур Игоревич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжение промышленных предприятий, e-mail: tobac15@mail.ru

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия.

MULTI-OBJECTIVE TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF A PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR AGRICULTURAL MACHINERY

T. I. Petrov

Abstract. The relevance of this study is due to necessity to improve the energy efficiency and reliability of electric drives used in agricultural machinery operating under extreme conditions: high dustiness, unstable loads, seasonality of operation and limited cooling. To design electric motors resistant to these factors, the author has modernized a topology optimization method previously tested on low-power electric vehicles. This article examines the application of topology optimization for permanent-magnet synchronous motors in agricultural machinery, taking into account the specific operating conditions, including high dustiness, unstable loads and limited cooling capabilities. A multi-criteria objective function is proposed that integrates the key operating parameters of permanent magnet synchronous motors: active material mass (weight factor of 0.25), electromagnetic losses (0.35), maximum temperature (0.25) and magnetic induction pulsation (0.15). The initial motor configuration (50 kg mass, 1200 W losses, 110°C temperature, 20 mT pulsation) is optimized using a genetic algorithm. Based on an estimated calculation over 10 iterations, the objective function is reduced from 0.944 to 0.788 while simultaneously improving all parameters: mass is reduced by 11%, losses by 27.7%, temperature by 13.6%, and pulsation by 26%. A graph of the objective function change and tables of parameters by iterations are presented, and the magnetic induction field is calculated. Clearly, the solution's efficiency will decrease with practical implementation, but even preliminary results confirm that topology optimization allows for adapting motor design to the specifics of agricultural machinery, resulting in reduced weight, increased energy efficiency, and increased service life under multifactorial conditions. The developed approach eliminates traditional tradeoffs between weight, losses, and thermal performance, offering a comprehensive solution for the stable operation of electric drives in the agricultural sector.

Key words: topology optimization, electric machine, synchronous motor, modeling, genetic algorithm.

References

1. Allaire G, Gfrerer MH. Autofreefem: automatic code generation with FreeFEM and LaTex output for shape and topology optimization of non-linear multi-physics problems. Structural and multidisciplinary optimization. 2024; Vol.67. No.12. 213 p. doi: 10.48550/arXiv.2407.11713.

2. Babcock T, McKeever B, Hicken JE. Electrothermal coupling methodologies and their influence on the optimization of aircraft electric motors. AIAA Journal. 2024; Vol.62. No.7. 2659-2677 p. doi: 10.2514/1.J063627.

3. Baeck L, Blauth S, Leithauser C. Topology optimization for uniform flow distribution in electrolysis cells. PAMM. 2023; Vol.23. No.3. e202300163 p. doi: 10.1002/pamm.202300163.

4. Petrov T, Safin A. Modification genetic algorithm for topological optimization the rotor of synchronous motors. Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of ICEPP. 2021; Vol.190. 151-156 p. doi: 10.1007/978-3-030-86047-9_16.

5. Safin A, Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors. E3S Web Conf. 2020; Vol.220. 01040 p. doi: 10.1051/e3sconf/202022001040.

6. Cesarano A, Dapogny C, Gangl P. Space-time shape optimization of rotating electric machines. Mathematical models and methods in applied sciences. 2024; Vol.34. No.14. 2647-2708 p. doi: 10.48550/arXiv.2402.07017.

7. Gangl P. A multi-material topology optimization algorithm based on the topological derivative. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2020; Vol.366. 113090 p. doi: 10.1016/j.cma.2020.113090.

8. Gangl P, Sturm K. Automated computation of topological derivatives with application to nonlinear elasticity and reaction-diffusion problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2022; Vol.398. 115288 p. doi: 10.1016/j.cma.2022.115288.

9. Neofytou A, Rios T, Bujny M. Automatic differentiation-based level-set topology optimization for noise minimization in 3D domains considering acoustic-structure interaction. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2025; Vol.68. No.3. 67 p. doi: 10.1007/s00158-025-03995-z.

10. Kim HJ, Baek SW. Optimal shape design to improve torque characteristics of interior permanent magnet synchronous motor for small electric vehicles. Microsystem Technologies. 2024; Vol.31. 1203-1217 p. doi: 10.1007/s00542-024-05699-8.

Author:

Petrov Timur Igorevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Industrial Power Supply Department, e-mail: tobac15@mail.ru

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-107-118
УДК 636.085.54

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОБЕЛКОВОГО КОРМОВОГО ПРОДУКТА ИЗ ЛЮПИНА

Д. Б. Просвирников, Д. В. Тунцев, М. К. Гайнуллина, О. А. Якимов, Н. Р. Касанова

Реферат. Целью работы являлась разработка технологии получения высокобелкового кормового продукта из люпина белого с последующей оценкой в нем содержания протеина. В работе использовали люпин белый Дега (г. Иваново, Россия, урожай 2024 год). Семена измельчали, подвергали различным режимам предварительной обработки, а затем - ферментативному гидролизу с препаратами ГК «Фермент» (Беларусь) при t = 50°С, 130 мин$^{-1}$, pH = 4,5-5,0 10 ч. Ферментную композицию, которая позволила получить максимальный выход редуцирующих веществ, определяли экспериментально по полному трехфакторному плану (фактор X1 – дозировка целлюлазного комплекса, 0,005-0,4% от субстрата в сырье, X2 – дозировка гемицеллюлаз, 0,33-3,0%, X3 – дозировка липазы, 0,06-0,4%, отклик Y1 – концентрация редуцирующих веществ в % в гидролизатах). На смеси твердых продуктов и гидролизатов культивировали дрожжи *Candida tropicalis* ВКПМ Y-3 и *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1136 при t = 28-35°С, 90 мин$^{-1}$, pH=4,8-5,0 в течение 24 часов. После сушки итоговый ферментированный продукт измельчали и определяли содержание сырого протеина. Полученный в ходе работы концентрат содержал 47,2 ± 1,12% сырого протеина (при ферментации с участием дрожжей *Candida tropicalis*) и 44,9 ± 1,33% (с *Saccharomyces cerevisiae*), что демонстрирует высокую эффективность разработанной технологии по обогащению продукта протеином. Впервые разработана технология двухстадийной биоконверсии семян люпина в жидкой фазе по схеме «ферментативный гидролиз — культивирование дрожжей», обеспечивающая целевой гидролиз полисахаридов с сохранением белковых фракций.

Ключевые слова: люпин, белковый концентрат, мультиферментная композиция, технология, ферментативный гидролиз, микробный кормовой белок, дрожжи, белковый изолят, кормопроизводство.

Введение. Зернобобовые культуры играют значимую роль в устойчивом сельском хозяйстве, обеспечивая человека и животных ценными источниками белка. Они эффективно используются в рационах жвачных как концентрированные корма. Исследования подтверждают возможность замены сои, как основного источника растительных протеинов, на горох, фасоль, кормовые бобы, нут, чечевицу, люпин белый, люпин желтый, люпин узколистный без ущерба для продуктивности [1]. Однако наличие антипитательных факторов ограничивает их использование в кормах для моногастричных животных. Современные сорта люпина широко применяются в животноводстве во всем мире. Их семена содержат около 32–36% сырого протеина и до 40% некрахмальных полисахаридов. Люпин рассматривается как устойчивая альтернатива сое, однако вариабельность питательной ценности между сортами и ограниченные селекционные усилия требуют дальнейших исследований и селекции данной культуры. Бобовые, включая сою, люпин, горох и фасоль, выращиваются как основная культура во всем мире. Благодаря богатству незаменимыми аминокислотами и общими фенольными соединениями бобовые могут быть включены в рацион кормов животных, как источник белка. Кроме того, белки бобовых обладают хорошими функциональными свойствами для использования в качестве кормового ингредиента. Известно [2], что по кормовой ценности экструдированный концентрат на основе люпина не уступает экструдированному концентрату на основе сои и позволяет получать хорошие приросты живой массы животных и птицы. Концентрат на основе люпина с добавлением ферментов по биологической ценности равен полножирной сое.

При использовании зерна люпина узколистного с включением органического микроэлементного комплекса данный вид сырья может быть также использован как альтернатива сое в белковых концентратах [3].

Тем не менее, замена сои и соевого шрота на менее прихотливый к выращиванию люпин или продукты из него в рационах для большинства интенсивно выращиваемых животных, птиц и рыб возможна при условии поддержания постоянного уровня лизина, метионина и усвояемой энергии, а также снижения антипитательных факторов. Это делает люпин экономически конкурентоспособным во многих обстоятельствах. Для достижения свойств продуктов из люпина, сопоставимых с соей или соевым шротом, необходима эффективная биоконверсия растительного комплекса семян люпина.

Учитывая, что некоторые сорта люпина, да и бобовых в целом, содержат антипитательные вещества [4], предварительная обработка семян белкового растительного сырья играет вдвойне важную роль [1, 5].

Учитывая тот факт, что в составе нерастворимых и трудногидролизуемых полисахаридов присутствует в основном целлюлоза, для ее эффективной ферментативной конверсии требуются правильно подобранные ферментные композиции целлюлаз. Как правило, ферментативному гидролизу для получения глюкозы подвергаются предварительно обработанные материалы. Даже наличие стадии предварительной обработки требует синергического действия трех основных типов ферментов при гидролитической деструкции целлюлозы - эндоглюканазы, целлобиогидролазы

и β-глюкозидазы [6].

Полисахаридный комплекс любого лигноцеллюлозного сырья, в том числе и оболочки бобовых семян, включает в себя и гемицеллюлозы, тесно связанные с целлюлозой. Эффективный гидролиз таких комплексов подразумевает использование ферментов не только с целлюлолитической активностью, но и с гемицеллюлазной (в частности ксиланазной) [7].

В литературе встречается довольно большое количество разработок и предложений по мультиферментным комплексам для тех или иных видов растительных материалов, основываясь на которых, можно предположить потенциальные приблизительные составы мультиэнзимных комплексов для решения задач эффективной гидролитической деструкции лигноцеллюлозной матрицы оболочек бобовых, в частности люпина, или, по крайней мере, наметить пути разработки таких комплексов [8, 9].

Очевидно, дозы ферментных препаратов в композиции должны зависеть от сложности и активности ферментов, от компонентного состава сырья, а эффективность их использования будет определяться предварительной обработкой сырья, температурой, pH и продолжительностью гидролиза.

Получение высокобелковых продуктов из люпина требует понимания технологических особенностей переработки данного вида сырья, которая тесно связана с его ферментативной обработкой. Однако влияние ферментативного гидролиза на функциональные свойства бобовых семейства *Lupinus* до сих пор исследовалось мало. Люпин является перспективным сырьем из-за высокого содержания белков (от 32 до 37% от сухого веса) и превосходного аминокислотного профиля. Среди сладких видов люпина (*Lupinus luteus , Lupinus angustifolius и Lupinus albus*) желтый люпин (*Lupinus luteus*) обладает очень высоким содержанием белка и высоким содержанием клетчатки [10].

Обзор литературы по ферментативному гидролизу выявляет методологические проблемы, при которых нерастворимые и нефункциональные фракции гидролизатов бобовых белков удаляются перед анализом [11]. Эта литература может поставить под сомнение обоснованность общепринятого мнения о том, что ферментативный гидролиз всегда полезен для функциональности белка. Поскольку большинство растительных белков состоят из смеси различных белковых фракций, которые имеют различные изоэлектрические точки [12], необходима модификация их характеристик для улучшения их функциональных свойств белков, среди которых важными являются растворимость и эмульгирующие свойства. Тем не менее, все же большинство работ включают в технологию белковых продуктов из бобовых, в частности люпина, стадии ферментативного гидролиза [13, 14].

Эффективный ферментативный гидролиз, подразумевающий разрушение лигноцеллюлозного комплекса семян люпина с сохранением белковых структур является довольно сложной задачей. Как показывают исследования ферментативный гидролиз, как правило, сопровождается переходом растворимой фракции белков в гидролизаты. Если рассматривать культуру люпина как белковый источник для кормовых целей, нет необходимости в получении изолятов белка. Гораздо правильнее оставить все белковые фракции в сырье, но в измененных после ферментативного гидролиза аминокислотных профилях, а сахара, полученные после гидролиза полисахаридов, использовать как питательную среду для культивирования микробного кормового белка, получая на гидролизатах дополнительный источник протеина с иным аминокислотным составом. Возможно, в композиции из растительных белков люпина и микробного белка, полученного на углеводных гидролизатах люпина, с помощью регулирования режимов двухстадийной обработки «ферментативный гидролиз-культивирование» балансировать аминокислотный состав получаемых высокобелковых кормовых продуктов.

В литературе не встречается процессов совмещенной двухстадийной обработки «ферментативный гидролиз-культивирование» в жидкой фазе, однако имеется довольно много сведений о твердофазной ферментации бобовых [15, 16, 17], которые одновременно обрабатываются ферментами и культурами микроорганизмов, хотя в этом процессе не до конца ясны механизмы взаимного влияния ферментов, микроорганизмов и субстратов, режимы обработки. В разных исследованиях приводятся противоречивые сведения по качеству получаемых белковых продуктов, в частности изолятов белка [18].

С другой стороны, во время жидкофазной ферментативной обработки белкового растительного сырья целесообразно осаждать растворенные белки в более высокомолекулярные комплексы, и оставлять этот осадок в твердом продукте в качестве источника протеина в готовой кормовой добавке, а для питания микроорганизмов использовать сахара, полученные после поэтапного ферментативного гидролиза углеводной фракции люпина, и дополнительно введенные минеральные среды для их роста. Дрожжи, выращенные на углеводных гидролизатах, имеют иной аминокислотный состав и в итоговом продукте повышают общее содержание сырого протеина.

Учитывая сложный углеводный и белковый состав семян люпина, необходимо помимо предварительной обработки для удаления растворимых антипитательных веществ применять комплексные ферментные системы для целевого снижения содержания антипитательных полисахаридов, таких как клетчатка, гемицеллюлозы. Разработка ферментных мультиэнзимных композиций основывается на количественном содержании индивидуальных компонентов-субстратов в сырье, которые необходимо гидролизовать соответствующими ферментами с заданной активностью.

Целью работы являлась разработка технологии получения высокобелкового кормового продукта из люпина белого с последующей оценкой в нем содержания протеина.

Впервые разработана технология двухстадийной биоконверсии семян люпина в жидкой фазе по схеме «ферментативный гидролиз — культивирование дрожжей», обеспечивающая целевой гидролиз полисахаридов с сохранением белковых фракций. Работа устраняет малоизученный аспект взаимного влияния режимов гидролиза и микробиологического роста на гидролизатах на содержание протеина в итоговом продукте, что делает технологию конкурентоспособной альтернативой соевым протеинам.

Условия, материалы и методы. В работе использовали люпин белый сорта Дега, собранный в г. Иваново, Россия, урожай 2024 году. Сырье предварительно измельчали на лабораторной мельнице «ВЬЮГА 3МТ» (Россия), просеивали через сита с ячейками 0,1-0,5 мм. Компонентный состав сырья в массовых % от абсолютно сухого вещества (а.с.в.): влага - 6,87±0,03, целлюлоза – 16,81±0,27, легкогидролизуемые полисахариды – 21,9±1,21, лигнин – 0,24±0,01, крахмал – 5,1±0,01, жир – 9,98±0,02, экстрактивные вещества – 1,81±0,02, общий азот – 37,62±0,32, сырая зола – 5,15±0,15. Для проведения ферментативного гидролиза были использованы ферментные препараты ГК «Фермент» (Республика Беларусь). Расчетные дозировки в % от массы субстрата: Целлюлазный комплекс-0,1, Белазим ГЦ комплекс бета-глюканазы (6800) и ксиланазы (550) – 0,45, Ксиланаза – 0,1, Бета-маннаназа – 0,2, Липрозим С (группа 1) – 0,1, Белазим ХА альфа-амилаза – 0,2, Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500) – 0,1.

Ферментативный гидролиз люпина проводили следующим образом. В стерилизованные колбы 750 мл помещали подготовленное сырье (35,0 г) с известной влажностью (рис. 1), ферментную композицию в заданном количестве и соотношении (разведение водой 5 мл) и буфер (лимонная кислота/гидроксид натрия) в расчетном количестве (200 мл), колбы закрывали ватно-марлевым тампоном. Ферментативный гидролиз проводили в лабораторном шейкере-инкубаторе Kuhner ISF1-X (Швейцария) (рис. 2) при t = 50°С, 130 мин$^{-1}$, pH=4,5-5,0, в течение 10 часов. Продолжительность гидролиза выбрана на основании ранее проведенных исследований.



Рис. 1 – Подготовка к полному трехфакторному эксперименту



Рис. 2 - Ферментативный гидролиз в лабораторном шейкере-инкубаторе

Эксперимент проводили по полному трехфакторному плану (табл. 2) на двух уровнях варьирования факторов. Первый фактор X1 – дозировка целлюлазного комплекса (R цф, % от субстрата в сырье), X2 – дозировка гемицеллюлаз (Белазим ГЦ+ксиланаза+бетаманнаназа) (R гф, % от субстрата в сырье), X3 – дозировка липазы ЛИПРОЗИМ С (R жф, % от субстрата в сырье). План эксперимента представлен в таблице 1. Функция отклика: Y1 – концентрация редуцирующих веществ (РВ) в % в гидролизатах после ферментативного гидролиза (характеризует степень конверсии углеводного комплекса люпина). Для оценки воспроизводимости опыта в центре плана (ЦП) было дополнительно поставлено 3 параллельных опыта. Диапазоны варьируемых дозировок выбирались таким образом, чтобы центр плана приблизительно попадал в теоретически расчетные дозировки. Теоретические дозировки ферментов рассчитывали, учитывая активность индивидуальных ферментов и концентрацию субстрата (целлюлоза, легкогидролизуемые полисахариды, крахмал, жир). Максимальная дозировка в диапазоне варьирования – двукратная от теоретической.

Таблица 1- План эксперимента

	X1	X2	X3
№ опыта	R цф, % от субстрата в сырье	R гф, % от субстрата в сырье	R жф, % от субстрата в сырье
1	0,005	0,336	0,06
2	0,4	0,336	0,06
3	0,005	3,0	0,06
4	0,4	3,0	0,06
5	0,005	0,336	0,4
6	0,4	0,336	0,4
7	0,005	3,0	0,4
8	0,4	3,0	0,4
ЦП1	0,2025	1,668	0,23
ЦП2	0,2025	1,668	0,23
ЦП3	0,2025	1,668	0,23

Через 6, 8 и 10 часов из колб отбирали пробы гидролизата, центрифугировали на центрифуге Biobase (Китай) при 10000 мин-1 течение 5 минут, и в надосадочной жидкости определяли pH (на анализаторе Мультитест ИПЛ – 311, Россия), концентрацию редуцирующих веществ (далее - РВ) в пересчете на глюкозу (метод Бенедикта Бертрана, основанный на способности редуцирующих сахаров восстанавливать медно-щелочной реактив с образованием оксида одновалентной меди (Cu_2O), что позволяет количественно оценить содержание сахаров в образце). Полученные экспериментальные данные обрабатывали в программе Excel с получением регрессионной модели выхода РВ (функция Y1) в зависимости от концентрации ферментов (X1, X2, X3) и времени ферментативного гидролиза Т.

После определения состава ферментной композиции для ферментативного гидролиза, опыт повторили при различных режимах предварительной обработки:

1 – без предварительной обработки (контроль);

2 – предварительное удаление жира липазой 1 ч, в буфере с pH=8 и t=42ºС, центрифугирование, взвешивание твердого остатка, влажности, далее ферментативный гидролиз обработанного твердого остатка при дозировках, позволяющих получить максимальное содержание редуцирующих веществ;

3 – предварительное удаление крахмала в присутствии амилазы 0,5 ч, t=54ºС в буфере с pH=5, расчетная дозировка Белазим ХА альфа-амилаза; далее 0,5 ч t=54ºС pH=4,5, расчетная дозировка Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500), центрифугирование, взвешивание твердого остатка, влажности, далее ферментативный гидролиз обработанного твердого остатка;

4 – предварительное удаление жира и водорастворимых компонентов варкой в воде 1 ч, t=80ºС, центрифугирование, взвешивание твердого остатка, влажности, далее ферментативный гидролиз обработанного твердого остатка. Выбор температур и pH для проведения ферментативного гидролиза осуществляли в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя ферментов ГК «Фермент» (Республика Беларусь), с учетом максимальной активности индивидуальных ферментов.

Пробы отбирали через 2, 4, 6, 8 ч после начала гидролиза, не считая времени предварительной обработки. В гидролизатах определяли $РВ_{max}$ (%), по окончании гидролиза - в твердых остатках определяли $CN_{тв}$ (%) методом Къельдаля, подсчитывали конверсию углеводов $К_{угв\ max}$ (%). Гидролизаты после отделения твердой фракции были простерилизованы нагревом смеси до 80-85ºС с одновременным осаждением изолятов растительного белка. Изоляты отделяли от жидкости на центрифуге Biobase (Китай) при 10000 мин$^{-1}$ в течение 5 минут, и после сушки определяли содержание общего азота ($CN_{из}$, %) в изолятах. Все измерения проводили в трех повторностях.

После определения оптимального режима предварительной обработки, ферментативный гидролиз повторили с последующим культивированием дрожжей *Candida tropicalis u Saccharomyces cerevisiae* на смеси твердых продуктов и гидролизатов. В исследовании использовали предварительно засеянные на агаризованной питательной среде культуры одноклеточных дрожжей *Candida tropicalis* ВКПМ Y-3 и *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1136, пригодные для производства кормового белка. Оптимальная температура для роста составляет 28–35°С, pH 4,8-5,0 (режимы, рекомендованные Всероссийской коллекцией промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» для микроорганизмов, представленных в каталоге). Выбор культур основывался на предыдущем исследовании [19], в которым показана эффективность культивирования микроорганизмов на различных гидролизатах растительного сырья.

В охлажденные колбы с белковым продуктом и гидролизатом добавляли суспензию чистой культуры дрожжей, разбавленной в 30 мл стерильной воды, компоненты питательной среды ($(NH_4)_2SO_4$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, KH_2PO_4, K_2HPO_4, KCl, $Ca(NO_3)_2$, NaCl, дрожжевой автолизат). Колбы помещали в шейкер-инкубатор Kuhner ISF1-X (Швейцария) и выдерживали при температуре 28–35°С, pH 4,8-5,0 в течение 24 часов при оборотах 90 мин$^{-1}$. Для поддержания pH на оптимальном уровне 4,8-5,0 ед. в процессе роста биомассы дрожжей каждую среду подкисляли лимонной кислотой либо подщелачивали аммиачной водой. Оценка физиологического состояния дрожжевых клеток в смеси с субстратом проводилась методом микроскопии на оптическом микроскопе Микмед-6 (Россия) при увеличении (х450). По окончании процесса культивирования содержимое колб разливали на подносы и сушили при температуре 65ºС в сушильном шкафу в течение 24 часов. После сушки итоговый продукт измельчали и определяли в нем содержание сырого протеина методом Къельдаля (ГОСТ 13496.4-2019).

Сравнительные эксперименты (4 режима предварительной обработки) проводились в трехкратной повторности, результаты представлены в виде среднего значения ± стандартное отклонение. Достоверность различий между средними значениями оценивалась с использованием t-критерия Стьюдента. Критический уровень значимости принят равным $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В таблице 2 представлены результаты проведения полного трехфакторного эксперимента.

Таблица 2 – Результаты полного трехфакторного эксперимента

	X1	X2	X3	6 ч	8 ч	10 ч
№ опыта	R цф, %	R гф, %	R жф, %	РВ, %	РВ, %	РВ, %
1	0,005	0,336	0,06	1.4688	1.3719	0.8567
2	0,4	0,336	0,06	1.8262	1.3073	1.2429
3	0,005	3,0	0,06	2.2306	1.2429	1.3719
4	0,4	3,0	0,06	1.8589	1.5011	1.0819
5	0,005	0,336	0,4	1.6633	1.5984	1.0175
6	0,4	0,336	0,4	1.3073	1.0819	1.2751
7	0,005	3,0	0,4	1.3396	1.2429	1.5984
8	0,4	3,0	0,4	0.7596	1.8262	1.0498
ЦП1	0,2025	1,668	0,23	1.5751	2.1215	1.7936
ЦП2	0,2025	1,668	0,23	1.5012	1.8916	1.6141
ЦП3	0,2025	1,668	0,23	1.5984	1.9243	1.5659

Как видно из таблицы 2, максимальный выход редуцирующих веществ 2,2306% наблюдается в опыте №3, в котором использована ферментная композиция следующего состава: целлюлаза (X1) – 0,005%, гемицеллюлаза (X2) – 3,0%, липаза (X3) – 0,06%. Продолжительность ферментативного гидролиза – 6 ч. Полученные данные не раскрывают закономерностей влияния состава ферментной композиции и продолжительности ферментативного гидролиза на выход РВ, хотя это является основополагающим фактором при разработке мультиэнзимных композиций под конкретные биотехнологические задачи. Взаимодействие ферментов друг с другом и их влияние на образующиеся продукты в условиях гидролиза, особенно гидролиза углеводной фракции люпина, мало изучено, но во многих работах такие сообщения о взаимовлиянии имеются [20]. Так, в зависимости от субстратов целлюлазы могут ингибироваться присутствием липаз, ксиланаз. К тому же, само действие ферментов может подавляться образующимися продуктами во время гидролиза – лигниновыми комплексами, экстрактивными веществами и другими [21].

После обработки экспериментальных данных в программе Excel была получена регрессионная модель выхода РВ (функция Y1) в зависимости от концентрации ферментов (X1, X2, X3) и продолжительности ферментативного гидролиза T:

Y1=(-0.64·T^2+0.095·T+1.7274)+(-2.28·T^2 +0.3947·T-1.6636) · (X1-0.202)/0.197+ (-0.31·T^2 +0.715·T-0.3182) · (X2-1.668)/1.332+ (-4.02·T^2+7.265·T-3.2019· (X3-0.23)/0.17+ (-8.24·T^2+13.008·T-4.958) · (X1-0.202) · (X2-1.668)/0.262+(-2.06·T^2+3.0468·T-1.4551) · (X1-0.202) · (X3-0.23)/0.033+(-3.6·T^2+ 6.277·T-2.6774) · (X2-1.668) · (X3-0.23)/0.226+ (-1.65·T^2+ 2.493·T-0.838) · (X1-0.202) · (X2-1.668) · (X3-0.23)/0.045

Адекватность полученной регрессионной модели оценивалась с помощью F-критерия Фишера, при сопоставлении расчетных данных с экспериментальными. Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке 3.

Максимальная абсолютная погрешность модели составляет 0,0584% (в % РВ), максимальная относительная погрешность – 4,8%.

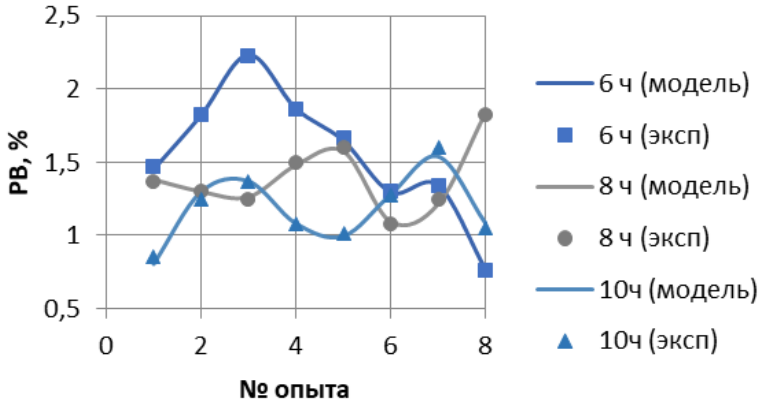


Рис. 3 – Расчетные и экспериментальные данные выхода РВ

По результатам ферментативного гидролиза была определена ферментная композиция (опыт №3) (рис. 4), при которой достигалось наибольшее содержание РВ в гидролизатах (2,231%), и, соответственно, наибольшая конверсия углеводов (34%). Максимальный выход редуцирующих веществ наблюдался на 6-м часу ферментативного гидролиза, после чего при дальнейшем увеличении длительности процесса выход снижался. Это можно объяснить снижением активности ферментов в результате образования и накопления

продуктов гидролиза, приводящим к обратному ингибированию ферментативной реакции. В результате продление гидролиза свыше 6 часов не способствует дальнейшему увеличению выхода моносахаров.

Таким образом, наиболее эффективной ферментной композицией из ферментных препаратов ГК «Фермент» для ферментативного гидролиза люпина является R цф : R гф : R жф (0,005:3,0:0,06) в % от массы субстрата. Продолжительность гидролиза при такой композиции – 6 ч. На 8 часу гидролиза для достижения максимального выхода РВ необходима композиция R цф : R гф : R жф (0,4:3,0:0,4). 10-й час гидролиза еще более снижает максимальный выход РВ, в связи с чем последующий гидролиз проводили в течение 6-8 часов.

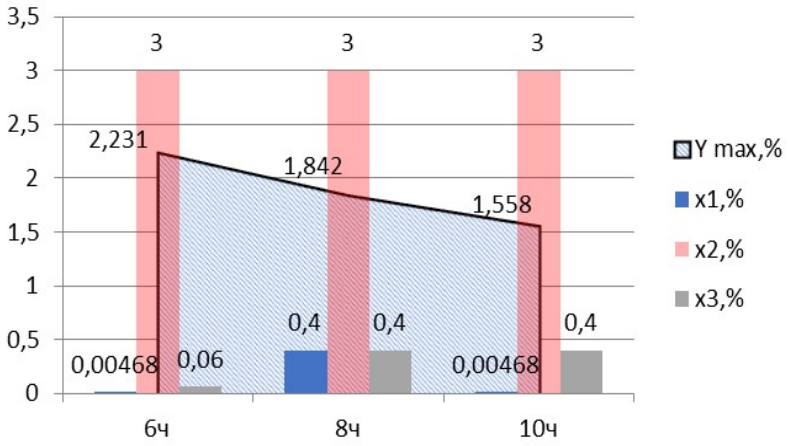


Рис. 4 – Ферментные композиции для ферментативного гидролиза люпина

Учитывая сложный компонентный состав люпина, а также исключения взаимовлияния ферментов друг на друга, были отработаны различные виды предварительной обработки измельченного сырья перед гидролизом. Режимы предварительной обработки: 1 - без предварительной обработки (контроль), повтор опыта №3; 2 - предварительное удаление жира липазой (1 ч, в буфере с pH=8 и t=42ºC, центрифугирование, взвешивание твердого остатка, влажности, далее ферментативный гидролиз обработанного твердого остатка (опыт №3); 3 - предварительное удаление крахмала в присутствии амилазы (0,5 ч, t=54 ºC в буфере с pH=5, расчетная дозировка Белазим ХА альфа-амилаза; далее 0,5 ч t =54ºC pH=4,5, расчетная дозировка Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500), центрифугирование, взвешивание твердого остатка, влажности, далее ферментативный гидролиз обработанного твердого остатка (опыт №3), 4 - предварительное удаление жира и водорастворимых компонентов варкой в воде (1 ч, t=80ºC, центрифугирование, взвешивание твердого остатка, влажности, далее ферментативный гидролиз обработанного твердого остатка (опыт №3).

Ферментативный гидролиз проводили при дозировках, полученных при ПФЭ: первые 6 часов R цф : R гф : R жф (0,005:3,0:0,06), t=55ºC, pH=5.5, последующие 2 часа при R цф : R гф : R жф (0,4:3,0:0,4), t=50ºC, pH=5.0. Пробы отбирали через 2,4,6,8 ч после начала гидролиза, не считая времени предварительной обработки. В гидролизатах определяли РВ ($РВ_{max}$,%), по окончании гидролиза - в твердых остатках определяли $CN_{тв}$ (%) методом Къельдаля, подсчитывали конверсию углеводов ($К_{угв\ max}$, %). Гидролизаты после отделения твердой фракции были простерилизованы кипячением. Во время кипячения в гидролизатах выпадал белый осадок в виде хлопьев (изолят растительного белка), который также был отделен от жидкости центрифугированием и проанализирован на содержание общего азота ($CN_{из}$, %). В таблице 3 и на рис. 5 представлены результаты эксперимента.

Таблица 3 – Результаты ферментативного гидролиза люпина с предварительной обработкой

Показатели	Режимы предварительной обработки			
	1	2	3	4
$CN_{тв}$ в твердом остатке, %	30,99±1,55	26,84±1,34	26,32±1,32	35,45±1,77
$CN_{из}$ в изоляте белка, %	68,66±3,43	77,64±3,88	84,38±4,22	51,14±2,56
$РВ_{max}*10^{-1}$,	17,6±0,88	5,7±0,29	3,4±0,17	5,6±0,28
$К_{угв\ max}$, %	24,28±1,21	12,14±0,61	7,34±0,37	11,97±0,59
t, ºC	-	42±2,1	54±2,7	80±4
pH	-	8±0,4	4,5±0,23	6,7±0,33

P<0,05

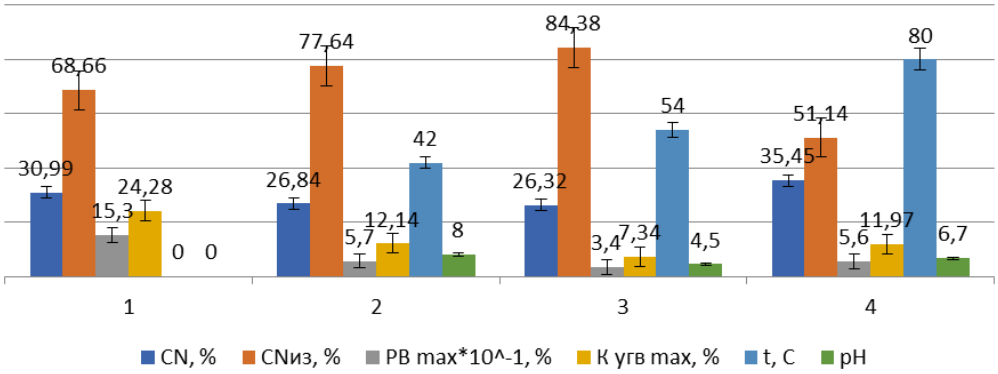


Рис. 5 - Результаты ферментативного гидролиза люпина с предварительной обработкой

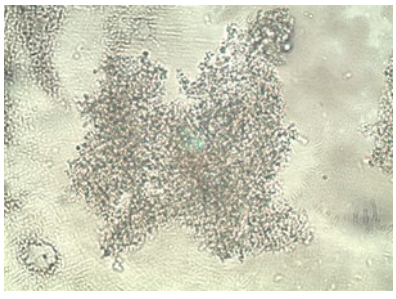
Из данных видно, что содержание CNтв в твердых остатках снижается относительно исходного, что объясняется переходом в гидролизат растворимых альбуминов и части глобулинов растительного белка. Аналогичные результаты наблюдались и у коллег, например, в [21], где сообщается, что в основном изолят белка люпина имел концентрацию сырого протеина 82,50±0,88% с высоким содержанием глицина/глутамина, аргинина и аспарагиновой кислоты/аспарагина.

Так, изолят растворимых белков в опыте 3 (предварительное удаление крахмала в присутствии амилазы) содержит общий азот CNиз=84,38%. Очевидно, в его состав входят и растворенные после гидролиза сахара. Растворимость белков люпина и переход их в гидролизат после предварительной обработки повышается, особенно при повышении pH и температуры предварительной обработки.

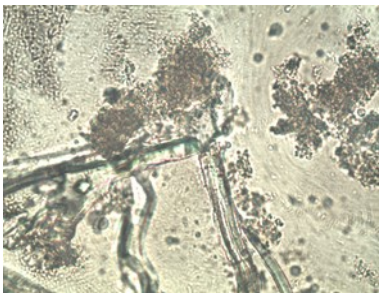
Различия в эффективности предварительной обработки статистически значимы. Дисперсионный анализ подтвердил существенное влияние способа предварительной обработки на конечные показатели ($p<0,05$). Например, вариант №3 – предварительное удаление крахмала ферментами – обеспечил содержание протеина в изоляте 84,38±4,22%, что достоверно выше, чем у варианта №4 (варка в воде; 51,14±2,56%, $p<0,05$). Таким образом, применение амилолитической обработки сырья повышает эффективность последующего ферментолиза.

Содержание РВ в зависимости от предварительной обработки не удалось адекватно оценить, поскольку после обработок твердые остатки центрифугировались и помещались в новые буферные растворы, в связи с чем остаточные содержания РВ в гидролизатах составили 0,34-0,57%. Вероятно, большая часть растворимых углеводов была удалена на этапе предварительных обработок. Без центрифугирования (опыт №1) показал сопоставимые значения РВ с опытом в полнофакторном эксперименте (при 8 часах). По результатам исследования влияния предварительной обработки установлено, что предварительное удаление крахмала в присутствии амилазы ферментами ГК «Фермент» позволяет получить изоляты с максимальным содержанием сырого протеина (84,38%), при этом в твердом остатке протеина остается 26,32%.

На рис. 6 представлены микрофотографии твердого остатка после ферментативного гидролиза и предварительной обработки. Для сравнения представлены обработки №3 и №4.



а)



б)

Рис. 6 – Твердый остаток после ферментативного гидролиза и предварительной обработки: а) в присутствии амилазы (0,5 ч, t=54ºС в буфере с pH=5, расчетная дозировка Белазим ХА альфа-амилаза; далее 0,5 ч t =54ºС pH=4,5, расчетная дозировка Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500); б) варкой в воде 1 ч, t=80ºС

Предварительная обработка амилолитическими ферментами (рис. 6, а) с последующим ферментативным гидролизом позволяет более полно провести гидролиз – на фотографии частицы выглядят равномерно пористыми, со сглаженными краями. Возможно влияние предварительной обработки амилазами способствует при

последующем гидролизе более интенсивному проникновению остальных ферментов в структуру углеводной матрицы, и, как следствие более полному гидролизу, хотя это нельзя точно доказать по конечных выходам РВ в оставшихся гидролизатах. Однако, косвенный показатель – содержание сырого протеина в твердом остатке и высокое содержание протеина в изоляте белка свидетельствует о высокой растворимости белков, которая, возможно является следствием более эффективного гидролиза. Предварительная варка водой менее способствует гидролизу, что видно на фотографиях – в твердом остатке имеются включения растительных волокон, частицы более плотные и агломерированные, и менее пористые. Также можно сделать вывод о меньшей эффективности предварительной варки водой по показателям содержания сырого протеина в твердом остатке и изоляте.

Жидкая фаза с перемешиванием обеспечивает интенсификацию массообменных процессов, реакций гидролиза, высвобождение продуктов деструкции углеводного комплекса растительного сырья, равномерное распределение температуры и концентраций биокатализатора, что способствует более полному гидролизу полисахаридов (клетчатки, гемицеллюлоз) с образованием простых сахаров в гидролизате. Поэтапное введение ферментов также обеспечивает более высокую конверсию углеводного комплекса.

Объединение двух белковых фракций – твердого остатка и изолята, образующегося после ферментолиза – может привести к повышению общего азота в смеси и изменению аминокислотного профиля кормового продукта из люпина. Эта смесь по-прежнему будет содержать в себе сахара, образованные в результате ферментативного гидролиза. Предварительную обработку следует вести без последующего отделения твердой и жидкой фракции, а по окончании ферментативного гидролиза смесь необходимо нагреть до осаждения растворенной фракции белков. Таким образом, итоговый продукт будет содержать твердую фракцию – твердый остаток с нерастворимыми протеинами и пониженным содержанием полисахаридов и жиров и осажденный изолят растворимых белков, и жидкую фракцию – раствор сахаров, аминокислот и жирных кислот.

Такой состав продукта обеспечивается выбранной предварительной обработкой №3, отсутствием стадии центрифугирования.То есть все сухие вещества после ферментативного гидролиза должны оставаться в твердом продукте. Не исключено, что концентрация белка в готовом продукте будет сильно отличаться от начальной концентрации в люпине, однако, некоторые деструктурированные белковые фракции и растворенные белки, а также простые углеводы должны стать питательной средой для культивирования микробного белка на такой среде.

Поскольку целевой функцией готового белкового продукта из люпина является сырой протеин – наиболее эффективным режимом на данном этапе является: предварительное удаление крахмала в присутствии амилазы (0,5 ч, t=54ºС в буфере с pH=5, дозировка Белазим ХА альфа-амилаза - 0,2% от массы субстрата ; далее 0,5 ч t =54ºС pH=4,5, расчетная дозировка Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500) - 0,1% от массы субстрата), затем ферментативный гидролиз по следующей схеме - первые 6 часов при ферментной композиции R цф : R гф : R жф (0,005:3,0:0,06), t=55ºС, pH=5,5, последующие 2 часа при ферментной композиции R цф : R гф : R жф (0,4:3,0:0,4), t=50ºС, pH=5.0, нагрев содержимого до 80-85ºС, охлаждение.

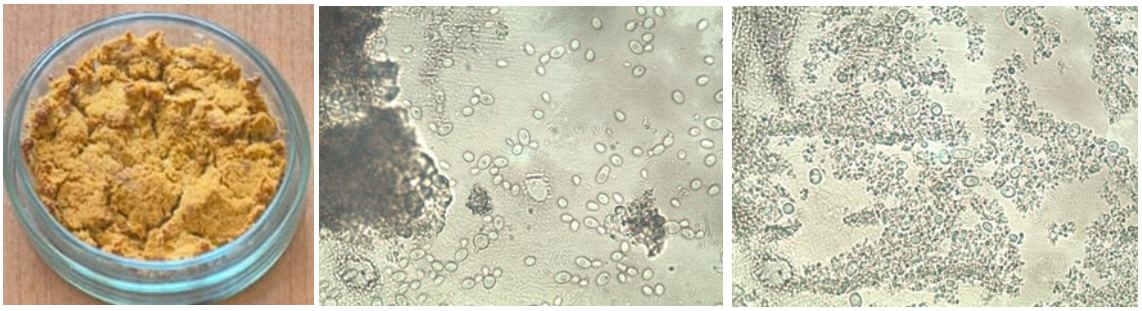
По результатам исследования установлено, что во время ферментативной обработки белкового растительного сырья в гидролизат переходит большое количество растворимых белков. Если на таких гидролизатах в дальнейшем культивировать микроорганизмы они в первую очередь будут потреблять источники азота (аминокислоты, низкомолекулярные пептиды) и во вторую очередь источники углеводов – сахара и продукты гидролиза полисахаридов. В связи с чем доступных к быстрому усваиванию микроорганизмами аминокислот в гидролизате должно быть меньше, чтобы основным питанием микроорганизмов были простые сахара – продукты ферментативного гидролиза полисахаридов. С этой целью целесообразно осаждать растворенные белки после ферментативного гидролиза в более высокомолекулярные комплексы, и оставлять этот осадок в твердом продукте в качестве источника протеина в готовой кормовой добавке, а для питания микроорганизмов использовать сахара, полученные после поэтапного ферментативного гидролиза, и дополнительно введенные минеральные среды для их роста. К тому же осажденные белки могут иметь другой аминокислотный состав в отличие от нерастворенных, оставшихся в твердом продукте после гидролиза, что позволит балансировать аминокислотный состав итогового кормового продукта. Дрожжи, выращенные на углеводных гидролизатах, также могут иметь иной аминокислотный состав и в итоговом продукте повышают общее содержание сырого протеина.

По вышеуказанной схеме осуществляли культивирование кормовых дрожжей на продуктах ферментативного гидролиза, что позволило получить концентрированную высокобелковую кормовую композицию (рис. 7, а) с содержанием сырого протеина 47,2±1,12% а.с.в. в случае культивирования *Candida tropicalis*, и 44,9±1,33% а.с.в. в случае культивирования *Saccharomyces cerevisiae.*

Полученные результаты согласуются с данными литературы. Например, белковый препарат на основе люпина, полученный с применением трипсина содержал 45% белка [14].

Высокое содержание сырого протеина в нашем конечном продукте (около 45–47%), полученном, путем совмещенного ферментативного гидролиза и культивирования кормовых дрожжей также подтверждает, что люпин может служить эффективной альтернативой традиционным источникам кормового белка. Известно, что замена продуктов из сои на люпин в рационах животных не снижает их продуктивности [3], что подчёркивает практическую значимость разработанной технологии.

Микроскопическое исследование субстратов с выращенными на них дрожжами показало, что клетки *S.cerevisiae* (рис. 7, б) круглые или яйцевидные, эллипсовидные, прорастающие почкованием, 5–10 мкм в диаметре, частицы субстрата плотные, клетки дрожжей и агломератов субстрата распределены неравномерно. У *C. Tropicalis* (рис. 7, в) - клетки также с формой от круглой до овальной, размером приблизительно от 2 до 10 мкм, субстрат более пористый, клетки биомассы более равномерно распределены в композиции.



а) б) в)

Рис. 7 - Высокобелковая кормовая композиция: а) после совмещенного процесса ферментативного гидролиза-культивирования и сушки; б) с *Saccharomyces cerevisiae* (увеличение х450), в) с *Candida tropicalis* (увеличение х450)

По отработанным режимным параметрам процесс воспроизвели на лабораторном биореакторе (рис. 8) объемом 5 л (с использованием дрожжей *Candida tropicalis*) с получением лабораторных композиций, концентрированных высокобелковых кормовых добавок на основе концентратов растительного протеина и кормового микробного белка. Для реактора 5 л культуры *Candida tropicalis* предварительно выращивали из технически чистых культур в колбе на питательной среде Ридера, после чего засевали в смесь после ферментативного гидролиза люпина.



а) б) в) г) д)

Рис. 8 – Получение белкового концентрата на лабораторном биореакторе объемом 5 л: а) загрузка реактора, б) выгрузка продукта после совмещенного процесса ферментативного гидролиза и культивирования дрожжей *Candida tropicalis*, в) отстаивание, г) сушка, д) готовый измельченный высокобелковый продукт

По органолептическим свойствам продукт имеет цвет от светло- до тёмно-коричневого, с выраженным запахом хлеба и дрожжей. Токсикологические исследования полученных композиций в соответствии с ГОСТ 31674-2012 показали, что продукт не токсичен. Содержание сырого протеина в продукте составило 46,2%, что на 8,6% выше, чем в исходном сырье, что дает основание рассматривать возможность использования данного высокобелкового продукта в качестве источника протеина в кормлении сельскохозяйственных животных и птицы. Дальнейшая работа будет посвящена изучению аминокислотного состава полученного продукта, сравнения его с аналогами (соя, соевый шрот), разработке и расчету рецептур полнорационных комбикормов с использованием полученных концентрированных высокобелковых кормовых добавок, а также разработка технологии применения полнорационных комбикормов, включающих разработанные высокобелковые композиции, в животноводстве с проведением масштабных зоотехнических испытаний.

Таким образом, в ходе исследования разработаны режимы ферментативной обработки семян люпина, обеспечивающие глубокую деструкцию углеводного комплекса и высвобождение простых сахаров. Предварительная обработка сырья амилолитическими ферментами значительно повысила степень растворения белков люпина, и в комбинации с последующим культивированием дрожжей это позволило обогатить продукт микробным белком. В результате получен высокобелковый кормовой продукт с повышенным содержанием сырого протеина, что подтверждает эффективность предложенной биотехнологии переработки люпина и открывает перспективы использования люпина в качестве альтернативного источника кормового протеина.

Выводы. В результате проведенной работы разработана технология ферментативной конверсии семян люпина в высокобелковый кормовой продукт. Установлен состав мультиферментной композиции и режим гидролиза, обеспечивающие максимальный выход редуцирующих сахаров (~2,23% на 6-м часу процесса). Показано, что предварительная обработка сырья амилолитическими ферментами повышает растворимость белков и позволяет получить протеиновый изолят с содержанием сырого протеина до 84,4%. Совмещенный процесс ферментативного гидролиза углеводов и культивирования дрожжей повысил общий выход протеина: полученный кормовой продукт отличается высоким уровнем сырого протеина. Проведенные токсикологические испытания (по ГОСТ 31674–2012) подтвердили отсутствие токсичности продукта, что позволяет рекомендовать его в качестве безопасной концентрированной кормовой добавки.

Полученный в ходе работы концентрат содержал 47,2±1,12% сырого протеина (при ферментации с участием дрожжей *Candida tropicalis*) и 44,9±1,33% (с *Saccharomyces cerevisiae*), что демонстрирует высокую эффективность разработанной технологии по обогащению продукта протеином.

Таким образом, поставленная цель исследования была полностью достигнута. Разработанная технология обладает существенным практическим значением для агропромышленного комплекса: использование люпина в качестве источника кормового белка может позволить частично заменить соевые продукты в рационах, снижая дефицит протеина и зависимость отрасли от импортного соевого шрота. На текущем этапе исследования себестоимость 1 тонны высокобелковой кормовой добавки из люпина составляет39,756 тыс. руб. Стоимость и качество получаемой высокобелковой кормовой добавки сопоставимы с соевым шротом, являющимся на сегодняшний день одним из основных белковых источников в животноводстве.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением аминокислотного профиля полученного протеинового продукта и сравнением его питательной ценности с традиционными соевыми концентратами. Кроме того, необходимо разработать рецептуры полнорационных комбикормов с включением полученного концентрата и провести масштабные испытания его эффективности в рационах сельскохозяйственных животных и птицы.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Литература

1. Optimal Enzymatic Hydrolysis of Sweet Lupine Protein Towards Food Ingredients / D. Pasarin, V. Lavric, C. E. Enascuta, et al. // Fermentation. 2023. Vol. 9. Iss. 3. P. 203. doi: 10.3390/fermentation9030203.

2. Rationale for the Choice of Enzyme Complex for Biocatalytic Treatment of Black Chokeberry Cake / G. S. Volkova, E. N. Sokolova, V. V. Ionov, et al. // Proc. 2023 Intern. Conf. on Agricultural Engineering and Technologies. 2023. P. 23–25. URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230213738 (дата обращения 27.11.2025). doi: 10.52653/PPI.2023.5.5.006.

3. Fedorova Z. N. Protein Concentrates Based on Extruded Lupine Grain, With Use of Enzymes, in Feeding Calves and Poultry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol-UK: IOP Publishing, 2021. Vol. 663. No. 1. Art. no. 012021. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44857577. (дата обращения 27.11.2025). doi: 10.1088/1755-1315/663/1/012021.

4. Khorsandi A. The Use of Solid-State Fermentation to Improve the Protein Quality, Functionality and Flavour of Pulse Protein Isolates. Dissertation. University of Saskatchewan, Canada, 2022.

5. Impact of Supercritical CO_2 Treatment on Lupin Flour and Lupin Protein Isolates / R. Domínguez-Valencia, R. Bermúdez, M. Pateiro, et al. // Foods. 2025. Vol. 14. Iss. 4. P. 675. doi: 10.3390/foods14040675.

6. Optimization of an Artificial Cellulase Cocktail for High-Solids Enzymatic Hydrolysis of Cellulosic Materials with Different Pretreatment Methods / J. Du, J. Liang, X. Gao, et al. // Bioresource Technology. 2020. Vol. 295. P. 122272. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122272.

7. Kim I. J., Lee H. J., Kim K. H. Pure Enzyme Cocktails Tailored for Saccharification of Sugarcane Bagasse Pretreated Using Different Methods // Process Biochemistry. 2017. Vol. 57. P. 167–174. doi: 10.1016/j.procbio.2017.04.006.

8. Mironova G. F., Skiba E. A., Kukhlenko A. A. Preparing Nutrient Media From Lignocellulose: Optimizing the Composition of a Multienzyme Compound // Catalysis in Industry. 2020. Vol. 12. P. 162–168. doi: 10.1134/S2070050420020063.

9. Fedorova Z. N., Tkachenko Yu. G., Bliadze V. G. Grain of Narrow-Leaved Lupine with Inclusion of Organic Micronutrient Complex OMC as an Alternative to Soybeans in Protein Concentrates // IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science. Bristol-UK: IOP Publishing, 2021. Vol. 901. No. 1. P. 012022. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/901/1/012022/meta (дата обращения 27.11.2025). doi: 10.1088/1755-1315/901/1/012022.

10. Dent T., Maleky F. Pulse Protein Processing: The Effect of Processing Choices and Enzymatic Hydrolysis on Ingredient Functionality // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Vol. 63. Iss. 29. P. 9914–9925. doi: 10.1080/10408398.2022.2070723.

11. Wang M., Ettelaie R., Sarkar A. Enzymatic hydrolysis of legume proteins: Lessons on surface property outcomes // Current Opinion in Food Science. 2025. Vol.. 62. P. 101259. doi: 10.1016/j.cofs.2024.101259/

12. Effect of Enzymatic Hydrolysis on Solubility and Emulsifying Properties of Lupin Proteins (Lupinus luteus) / M. Opazo-Navarrete, C. Burgos-Díaz, K. A. Garrido-Miranda, et al. // Colloids and Interfaces. 2022. Vol. 6. Iss. 4. P. 82. doi: 10.3390/colloids6040082.

13. Production of Herbal Protein Isolates with the Enzymatic Hydrolysis Technology / K. Leonid, D. Anna, T. Sergey, et al. // Int J Pharm Res Allied Sci. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 10–15.

14. Kebede Y. S., Teferra T. F. Isoelectric Point Isolation and Characterization of Proteins from Lupine Cultivars As Influenced by Chemical and Thermal Treatments // Heliyon. 2023. Vol. 9. Iss. 3. P.14027. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14027.

15. Effect of Solid-State Fermentation on Plant-Sourced Proteins: A Review / X. Feng, K. Ng, S. Ajlouni, et al. // Food Reviews International. 2024. Vol. 40. Iss. 9. P. 2580–2617. doi: 10.1080/87559129.2023.2274490.

16. Fungal Solid-State Fermentation of Crops and Their By-Products to Obtain Protein Resources: The Next Frontier of Food Industry / J. Wang, Z. Huang, Q. Jiang, et al. // Trends in Food Science & Technology. 2023. Vol. 138. P. 628–644. doi: 10.1016/j.tifs.2023.06.020.

17. Modulation of the Nutritional Value of Lupine Wholemeal and Protein Isolates Using Submerged and Solid-State Fermentation with Pediococcus Pentosaceus Strains / E. Bartkiene, V. Sakiene, V. Bartkevics, et al. // International Journal of Food Science and Technology. 2018. Vol. 53. Iss. 8. P. 1896–1905. doi: 10.1111/ijfs.13775.

18. Fermentation of Lupin Protein Hydrolysates—Effects on Their Functional Properties, Sensory Profile and Allergenic Potential of Major Lupin Allergen Lup An 1 / K. Schlegel, N. Lidzba, E. Ueberham, et al. // Foods. 2021. Vol. 10. Iss. 2. P. 281. doi: 10.3390/foods10020281.

19. Ферментативный гидролиз сельскохозяйственных растительных материалов с последующим культивированием кормовых дрожжей Candida tropicalis и Saccharomyces cerevisiae / Д.Б. Просвирников, Д.В. Тунцев, Р.Т. Валеева и др. // Аграрная наука. 2025. Т. 9. С. 141-150. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-141-150.

20. Understanding Phenolic Acids Inhibition of α-Amylase and α-Glucosidase and Influence of Reaction Conditions / A. Aleixandre, J.V. Gil, J. Sineiro, et al. // Food Chemistry. 2022. Vol. 372. P.131231. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131231.

21. Recent Advances in Understanding the Effects of Lignin Structural Characteristics on Enzymatic Hydrolysis / Y. Yuan, B. Jiang, H. Chen, et al. // Biotechnology for Biofuels. 2021. Vol. 14. P. 1. doi: 10.1186/s13068-021-02054-1.

Сведения об авторах:

Просвирников Дмитрий Богданович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры химической кибернетики, e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru

Тунцев Денис Владимирович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой химической кибернетики, e-mail: tuncev_d@mail.ru

Гайнуллина Мунира Кабировна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры химической кибернетики, e-mail: gainullinamun@yandex.ru

Якимов Олег Алексеевич – доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник кафедры химической кибернетики, e-mail: nikita.korolev.1984@mail.ru

Касанова Надия Радиковна - кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры химической кибернетики, e-mail: nadia-kasanova@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.

TECHNOLOGY FOR PRODUCING A HIGH-PROTEIN FEED PRODUCT FROM LUPINE

D. B. Prosvirnikov, D. V. Tuntsev, M. K. Gaynullina, O. A. Yakimov, N. R. Kasanova

Abstract. The aim of this study was to develop a technology for producing a high-protein feed product from white lupine, followed by an assessment of its protein content. Dega white lupine (Ivanovo, Russia, 2024 harvest) was used in this study. The seeds were crushed, subjected to various pre-treatment regimes, and then to enzymatic hydrolysis with preparations of Ferment Group of Companies (Belarus) at t = 50°C, 130 min-1, pH = 4.5-5.0 for 10 hours. The enzyme composition that allowed obtaining the maximum yield of reducing substances was determined experimentally using a complete three-factor design (factor X1 is the dosage of the cellulase complex, 0.005-0.4% of the substrate in the raw material, X2 is the dosage of hemicellulases, 0.33-3.0%, X3 is the dosage of lipase, 0.06-0.4%, response Y1 is the concentration of reducing substances in % in hydrolysates). Candida tropicalis VKPM Y-3 and Saccharomyces cerevisiae VKPM Y-1136 yeasts were cultured in a mixture of solid products and hydrolysates at 28-35°C, 90 min-1, and pH 4.8-5.0 for 24 hours. After drying, the final fermented product was ground and its crude protein content was determined. The resulting concentrate contained 47.2 ± 1.12% crude protein (during fermentation with Candida tropicalis yeast) and 44.9 ± 1.33% (with Saccharomyces cerevisiae), demonstrating the high efficiency of developed technology for enriching the product with protein. This is the first technology for two-stage bioconversion of lupine seeds in the liquid phase using the "enzymatic hydrolysis - yeast cultivation" scheme, ensuring targeted hydrolysis of polysaccharides while preserving protein fractions.

Key words: lupine, protein concentrate, multi-enzyme composition, technology, enzymatic hydrolysis, microbial feed protein, yeast, protein isolate, feed production.

References

1. Pasarin D, Lavric V, Enascuta CE. Optimal enzymatic hydrolysis of sweet lupine protein towards food ingredients. Fermentation. 2023; Vol.9. Issue 3. p. 203. doi: 10.3390/fermentation9030203.

2. Volkova GS, Sokolova EN, Ionov VV. Rationale for the choice of enzyme complex for biocatalytic treatment of black chokeberry cake. [Internet]. Proc. 2023 Intern. Conf. on Agricultural Engineering and Technologies. 2023; 23-25 p. [cited 2025, November 27]. Available from: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230213738. doi: 10.52653/PPI.2023.5.5.006.

3. Fedorova ZN. Protein concentrates based on extruded lupine grain, with use of enzymes, in feeding calves and poultry. [Internet]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol-UK: IOP Publishing. 2021; Vol.663. No.1. Art.no. 012021. [cited 2025, November 27]. Available from: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44857577. (дата обращения 27.11.2025). doi: 10.1088/1755-1315/663/1/012021.

4. Khorsandi A. The use of solid-state fermentation to improve the protein quality, functionality and flavour of pulse protein isolates. Dissertation. University of Saskatchewan, Canada, 2022.

5. Dominguez-Valencia R, Bermudez R, Pateiro M. Impact of supercritical CO2 treatment on lupin flour and lupin protein isolates. Foods. 2025; Vol.14. Issue 4. p. 675. doi: 10.3390/foods14040675.

6. Du J, Liang J, Gao X. Optimization of an artificial cellulase cocktail for high-solids enzymatic hydrolysis of cellulosic materials with different pretreatment methods. Bioresource Technology. 2020; Vol.295. 122272 p. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122272.

7. Kim IJ, Lee H, Kim KH. Pure enzyme cocktails tailored for saccharification of sugarcane bagasse pretreated using different methods. Process Biochemistry. 2017; Vol.57. 167-174 p. doi: 10.1016/j.procbio.2017.04.006.

8. Mironova GF, Skiba EA, Kukhlenko AA. Preparing nutrient media from lignocellulose: optimizing the composition of a multienzyme compound. Catalysis in industry. 2020; Vol.12. 162-168 p. doi: 10.1134/S2070050420020063.

9. Fedorova ZN, Tkachenko YuG, Bliadze VG. Grain of narrow-leaved lupine with inclusion of organic micronutrient complex OMC as an alternative to soybeans in protein concentrates. [Internet]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol-UK: IOP Publishing. 2021; Vol.901. No.1. 012022 p. [cited 2025, November 27]. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/901/1/012022/meta. doi: 10.1088/1755-1315/901/1/012022.

10. Dent T, Maleky F. Pulse protein processing: the effect of processing choices and enzymatic hydrolysis on ingredient functionality. Critical reviews in food science and nutrition. 2023; Vol.63. Issue 29. 9914-9925 p. doi: 10.1080/10408398.2022.2070723.

11. Wang M, Ettelaie R, Sarkar A. Enzymatic hydrolysis of legume proteins: Lessons on surface property outcomes. Current opinion in food science. 2025; Vol.62. 101259 p. doi: 10.1016/j.cofs.2024.101259/

12. Opazo-Navarrete M, Burgos-Diaz C, Garrido-Miranda KA. Effect of enzymatic hydrolysis on solubility and emulsifying properties of lupin proteins (Lupinus luteus). Colloids and Interfaces. 2022; Vol.6. Issue 4. 82 p. doi: 10.3390/colloids6040082.

13. Leonid K, Anna D, Sergey T, Production of herbal protein isolates with the enzymatic hydrolysis technology. Int J Pharm Res Allied Sci. 2020; Vol.9. Issue 3. 10-15 p.

14. Kebede YS, Teferra TF. Isoelectric point isolation and characterization of proteins from lupine cultivars as influenced by chemical and theral treatments. Heliyon. 2023; Vol.9. Issue 3. 14027 p. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14027.

15. Feng X, Ng K, Ajlouni S. Effect of solid-state fermentation on plant-sourced proteins: a review. Food Reviews International. 2024; Vol.40. Issue 9. 2580-2617 p. doi: 10.1080/87559129.2023.2274490.

16. Wang J, Huang Z, Jiang Q. Fungal solid-state fermentation of crops and their by-products to obtain protein resources: the next frontier of food industry. Trends in Food Science & Technology. 2023; Vol.138. 628-644 p. doi: 10.1016/j.tifs.2023.06.020.

17. Bartkiene E, Sakiene V, Bartkevics V. Modulation of the nutritional value of lupine wholemeal and protein isolates using submerged and solid-state fermentation with pediococcus pentosaceus strains. International Journal of Food Science and Technology. 2018; Vol.53. Issue 8. 1896-1905 p. doi: 10.1111/ijfs.13775.

18. Schlegel K, Lidzba N, Ueberham E. Fermentation of lupin protein hydrolysates – effects on their functional properties, sensory profile and allergenic potential of major lupin allergen lup an 1. Foods. 2021; Vol.10. Issue 2. 281 p. doi: 10.3390/foods10020281.

19. Prosvirnikov DB, Tuntsev DV, Valeeva RT. [Enzymatic hydrolysis of agricultural plant materials with subsequent cultivation of fodder yeasts Candida tropicalis and Saccharomyces cerevisiae]. Agrarnaya nauka. 2025; Vol.9. 141-150 p. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-141-150.

20. Aleixandre A, Gil JV, Sineiro J. Understanding phenolic acids inhibition of α-amylase and α-glucosidase and influence of reaction conditions. Food Chemistry. 2022; Vol.372. 131231 p. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131231.

21. Yuan Y, Jiang B, Chen H. Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. Biotechnology for Biofuels. 2021; Vol.14. 1 p. doi: 10.1186/s13068-021-02054-1.

Authors:

Prosvirnikov Dmitriy Bogdanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, chief researcher of Chemical Cybernetics Department, e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru

Tuntsev Denis Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher, Head of Chemical Cybernetics Department, e-mail: tuncev_d@mail.ru

Gaynullina Munira Kabirovna – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, leading researcher of Chemical Cybernetics Department, e-mail: gainullinamun@yandex.ru

Yakimov Oleg Alekseevich – Doctor of Biological Sciences, Professor, senior researcher of Chemical Cybernetics Department, e-mail: nikita.korolev.1984@mail.ru

Kasanova Nadiya Radikovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor, senior researcher of of Chemical Cybernetics Department, e-mail: nadia-kasanova@mail.ru

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-119-129
УДК 631.31

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ

В. Л. Федяев, Э. Р. Галимов, Р. Р. Ахметзянов, Т. Н. Вагизов, Г. В. Пикмуллин

Реферат. Цель настоящих исследований – определение оптимальной крюковой нагрузки и скорости движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных тракторов для повышения эффективности обработки почвы. Работа основано на теоретико-экспериментальном подходе, сочетающем методы математического моделирования и производственной оптимизации с верификацией по данным полевых испытаний. Полевые испытания проведены в ФГБОУ ВО Казанский ГАУ и Кировской МИС в период 1990-2005 годы на типичных агрофонах Среднего Поволжья: слежавшейся пахоте (при этом плотность составила 1350-1415 кг/м³, влажность 13-15%), свежевспаханном поле (1275-1315 кг/м³, 14-16%) и стерне (1475-1520 кг/м³, 12-14%). Использовались стандартные и сертифицированные приборы: динамометры R 320, счетчики расхода топлива DFM-5, приборы ЭИА-П и УРДП-АФИ. В результате установлено, что оптимальная крюковая нагрузка при прямолинейном движении МТА составляет 6.5 кН для почвы со средними свойствами, а оптимальная скорость движения – 1.25 от теоретической скорости агрегата. Для различных агрофонов нагрузка варьировалась: 6.9 кН на слежавшейся пахоте, 6.6 кН на свежевспаханном поле и 5.9 кН на стерне. При маневрировании МТА оптимальная нагрузка снижается с ростом теоретической скорости по гиперболическому закону: увеличение скорости на 70% приводит к снижению нагрузки на 25-30%. Коэффициент поворачиваемости при этом уменьшается на 15-20%, что позволяет сократить радиус поворота агрегата. Полученные соотношения позволяют количественно оценивать влияние агрофизических свойств почвы на режимы работы МТА и могут быть использованы при разработке систем автоматизированного управления сельскохозяйственной техникой.

Ключевые слова: машинно-тракторные агрегаты, прямолинейное движение, маневрирование, оптимизация, практические рекомендации.

Введение. Большинство сельскохозяйственных работ, особенно в растениеводстве, выполняется с применением достаточно сложных технических систем, требующих больших затрат, в том числе энергоресурсов, зачастую, в весьма сложных условиях. Поэтому постоянно совершенствуются соответствующая техника, технологии, разрабатываются специальные меры, приемы. Одно из направлений этой работы - оптимизация конструкций тракторов, машин, сельскохозяйственных орудий, режимов их работы. В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных универсально-пропашных тракторов.

Отдельные аспекты этой проблемы, касающиеся, в основном, повышения эффективности сельскохозяйственных тракторов и машинно-тракторных агрегатов рассматриваются в работах А. Н. Беляева, Т. В. Тришиной, А. Н. Брюховецкого, И. А. Высоцкой [1], В. В. Новикова, А. В. Поздеева [2], А. А. Глущенко, И. Р. Салахутдинова, А. К. Субаевой, Калимуллина М.Н. [3], С. М. Яхина, Ф. Х. Халиуллина, А. З. Имамиева, А.В. Матяшина, Егорова С.В. [4], С. В. Малюкова, Е. В. Позднякова, М. В. Шавкова, А.Ф. Петкова, И.И. Шанина, А.В. Белгова [5], А. А. Лопарева, К. В. Новикова, А. С. Комкина [6], А. Р. Валиева, И. Н. Матвеева, С. В. Щитова [7], А.А. Лопарева [8], Д. С. Гапича, В. А. Привалова [9], Н. В. Бышова, С. Н. Борычева, И. А. Успенскогои др. [10].

В некоторых из них, например, монография [6], приводятся определенные сведения об оптимальных скоростях трактора, его загрузке и других показателях. Постановка и решение задач оптимизации параметров многофункциональности тракторных агрегатов представлены в статье Маслова Г.Г., Юдиной Е.М., Цыбулевского В.В., Вовк В.В. [11]. Методики и примеры отыскания оптимальных скоростей движения МТА на базе гусенично - колесного трактора, режимов их маневрирования, а также конструкторских параметров описаны в работе Фасхутдинова М.Х., Федяева В.Л. [12]. Кроме того, в публикациях Бледных В.В., Свечникова П.Г. [13], Д.Т. Халиуллина, А.В. Белинского, А.Р. Валиева, Р.Р. Лукманова, Г. Бургеса [14], А.Р. Валиева, Г. С. Юнусова, А. А. Мустафина и др. [15] рассмотрены вопросы оптимизации энергетических и экономических показателей комбинированного агрегата. Комплекс исключительно важных проблем оптимизации доремонтной, межремонтной наработки, наработки до списания и уровня эксплуатации тракторов обсуждается в статьях И.Г. Галиева, К.А. Хафизова, А.А. Нурмиева, [16, 17].

Таким образом, в целом, оптимизации конструкций тракторов, сельскохозяйственных машин и орудий, МТА и уровня их эксплуатации посвящено довольно много исследований. Гораздо меньше - оптимизации движения машинно-тракторных агрегатов при выполнении разнообразных сельскохозяйственных работ (пахота, боронование, культивирование, посев и т.д.) с максимальным учетом особенностей применяемой техники, специфики данных работ, разных условий их выполнения, других факторов и требований. Поэтому тема настоящей статьи, целью которой являются исследования по определению оптимальной крюковой нагрузки и скорости движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных

тракторов для повышения эффективности обработки почвы, является актуальной. При этом решаются две практически важные оптимизационные задачи: прямолинейного (или близкого к нему) движения и маневрирования МТА. Специфика постановки и решения этих задач состоит в том, что в рамках теоретико-экспериментального подхода наряду с базовыми положениями теории производственной оптимизации широко используются имеющиеся в научно-технической литературе экспериментальные данные.

Условия, материалы и методы. Рассмотрим вначале равномерное прямолинейное либо близкое и прямолинейному движение машинно-тракторного агрегата (МТА) с колесным универсально-пропашным трактором, имеющим передние управляемые колеса с пневматическими шинами малого, а задние ведущие колеса с шинами большого типоразмера. Предположим, что движение осуществляется на горизонтальной почве однородного состава и структуры с нагрузкой на крюке, обусловленной навесными сельскохозяйственными орудиями, машинами, а также прицепами. Известно, что при этом действительная скорость движения МТА

$$v = \frac{0.1 \cdot n \cdot r_{kr}}{i_T} \ , \qquad (1)$$

где n - число оборотов в минуту коленчатого вала двигателя трактора, i_T - общее передаточное число трансмиссии, определяемое как отношение числа оборотов n к числу оборотов ведущих колес n_k; r_{kr} - кинематический радиус ведущих колес трактора при движении с нагрузкой.

Необходимо пояснить, что кинематический радиус колеса представляет собой радиус некоторого фиктивного недеформированного колеса, определяемый экспериментально с помощью формулы:

$$r_{kr} = \frac{S_k}{2\pi \cdot n_k} \ . \qquad (2)$$

В выражении (2) S_k - замеренная длина пути, пройденного за n_k оборотов колеса. В общем, кинематический радиус зависит от деформируемости покрышек, шин, давления в них; вертикальных и окружных нагрузок, действующих на шины, скорости вращения колеса, температуры окружающей среды.

С другой стороны, действительная скорость МТА

$$v = \frac{0.1 \cdot (1-\delta) \cdot n \cdot r_k}{i_T} \ . \qquad (3)$$

Здесь r_k - кинематический радиус ведущих колес при движении трактора без нагрузки, $\delta = \frac{v_T - v}{v_T}$ - коэффициент буксования, характеризующий относительное уменьшение действительной скорости v по сравнению с теоретической (возможной) скоростью агрегата

$$v_T = \frac{0.1 \cdot n \cdot r_k}{i_T} \ . \qquad (4)$$

Величина коэффициента буксования δ существенно зависит, во-первых, от давления в ведущих пневматических шинах, наличия почвозацепов на них, от значений тяговых усилий; во-вторых, от состава, структуры, плотности и влажности, а также температуры верхних обрабатываемых слоев почвы.

Далее остановимся на случае, когда в выражениях (1), (3) для v, а также в (4) величины i_T, $nr_k = \beta_k \cdot v_0$

$$(\ \beta_k = \frac{n r_k}{v_0}$$

- безразмерный множитель, v_0 - характерная скорость (v_0 =1.5 м/сек)) считаются заданными, а коэффициент буксования δ зависит, в основном, линейно от безразмерной крюковой нагрузки

$$p = \bar{p}_{kr} = \frac{P_{kr}}{P_0} \ ,$$

где P_{kr} – размерная крюковая нагрузка, $P_0 \approx 10$ кН – средняя (характерная) величина P_{kr}.

Очевидно, что в дополнение к нагрузке p необходимо учитывать характер верхних слоев почвы (например, слежавшаяся пахота, свежевспаханное поле, стерня), соответственно, изменение плотности ρ этих слоев, скорости v движения МТА, а также, пусть небольшое, угла поворота α_0 передних колес трактора. Учет названных факторов является достаточно сложной проблемой. В статье, ориентируясь на применение теоретико-экспериментального подхода, воспользуемся имеющимися в научно-технической литературе, в частности, в монографии [12] данными. Они были получены в период 1990-2005 годы в ФГБОУ ВО Казанском ГАУ, Кировская МИС в результате проведения полевых испытаний МТА с серийно производимыми колесными универсально-пропашными тракторами МТЗ в соответствии с имеющейся нормативной документацией, специально разработанной программой. При этом применялись как стандартные измерительные приборы и оборудование, так и сертифицированные приборы, приспособления и методики. Кроме того, были выделены два специально подготовленных участка с различными физико-механическими свойствами, замеры плотности, влажность почвы выполнялись многократно на разной глубине в теплое время года. Для повышения эффективности многофакторных экспериментов проводилось их планирование, при обработке полученных данных использовались имеющиеся методики.

Соответственно, перед началом испытаний осуществлялась проверка трактора согласно ГОСТ 25836-83, ГОСТ 28305-89; участки для испытаний выбирались по ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90), ГОСТ 26953-86;

эксперименты проводились в соответствии с ГОСТ 20915-75 в рамках программы, содержащей описание объекта исследований, комплектность материальной базы, используемых методик и приборного обеспечения, контролируемых параметров, показателей работы агрегатов и способов обработки полученных результатов.

Отметим, в частности, что на выбранных участках был ровный микрорельеф, агрофизический фон – слежавшаяся пахота, свежевспаханное поле, стерня. Характерные значения показателей их в весенне-летнее время проведение экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические показатели почвы

Наименование	Слежавшаяся пахота	Свежевспаханное поле	Стерня
Плотность, кг/м^3	1350-1415	1275-1315	1475-1520
Влажность, %	13-15	14-16	12-14

В качестве основных стандартных приборов применялись динамометры (весовые индикаторы R 320), датчики расхода топлива (счетчик – расходомер DFM - 5), прибор ЭИА-П для замера количества оборотов ведущих колес трактора, путеизмерительное (пятое) колесо, прибор УРДП-АФИ с дополнительным оборудованием (регистрация деформации почвы). Нестандартные приборы и приспособления использовались для определения тянущей силы движителя, оценки механических свойств почвы, сопротивления почвы сжатию и сдвигу. Применение названных приборов регламентируется соответствующими методиками, инструкциями.

В силу того, что рассматриваемые испытания представляют собой многофакторные эксперименты с целью минимизации количества их, применялась известная методика планирования экспериментов, включая операции обработки экспериментальных данных, также как оценка значений среднего квадратичного отклонения, коэффициентов вариации; критериев Стьюдента, Кохнера, характеризирующих однородность результатов измерений построенных дисперсий соответственно; критерия Фишера, позволяющих судить о том, во сколько раз расчетные значения откликов отличаются от экспериментальных данных. В целом, сравнения результатов расчетов, полученных с помощью регрессионных зависимостей (математических модулей), и экспериментов показывают удовлетворительное согласие их [12].

Из результатов испытаний следует, что относительно безразмерных переменных аппроксимационная зависимость коэффициента буксования от названных параметров будет:

$$\delta_i = a_i\,(\bar{\rho}_i,\ \bar{v},\ \bar{\alpha}_0) + b_i\,(\bar{\rho}_i,\ \bar{v},\ \bar{\alpha}_0)\cdot p. \qquad (5)$$

Здесь индекс i (i=1,2,3) означает соответствующие показатели буксования δ_i, безразмерной плотности

$$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_i}{\rho_{0i}}$$

(ρ_{0i} - средняя плотность), коэффициентов a_i, b_i для различных агрофизических фонов (i=1 - слежавшаяся пахота, i=2 свежевспаханное поле, i=3 стерня). Безразмерные скорость движения МТА $\bar{v} = \frac{v}{v_0}$, угол поворота $\bar{\alpha}_0 = \frac{2\pi\alpha_0}{360}$.

Приблизительно, в соответствии с результатами экспериментов, имеем:

$$a_i \approx k_i(\bar{\delta}_0 + \tilde{\alpha}_0 \cdot f_{i0})\tilde{v}\ ,$$
$$b_i \approx \bar{k}_0\tilde{\alpha}_0\tilde{v}\ . \qquad (6)$$

В формулах $\tilde{\alpha}_0 = \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_{00}}$ (6) ($\bar{\alpha}_{00}$ = 0.47 - нормирующий коэффициент), $\tilde{v} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0}$ ($\bar{v}_0$=0.67 - нормирующий множитель); $\bar{\delta}_0$≈0.33, $\bar{k}_0$≈0.30 - соответственно, средние значения коэффициента буксования при прямолинейном движении МТА (α_0=0) и множителя b_i, когда $\bar{\alpha}_0 = \bar{\alpha}_{00}$, $\bar{v} = \bar{v}_0$. При этом параметры

$$k_i = k_i(\bar{\rho}_i) = \begin{cases} 0.85 \\ 1.35 \\ 0.26 \end{cases},$$
$$f_{i0} = f_{i0}(\bar{\rho}_i) = \begin{cases} 0.10\ (i=1) \\ 0.12\ (i=2) \\ 0.06\ (i=3) \end{cases}. \qquad (7)$$

Необходимо иметь в виду, что данные параметры неявно зависят от безразмерной плотности $\bar{\rho}_i$ обрабатываемого слоя почвы. Видно, что наибольшие значения они принимают в случае слежавшейся пахоты, наименьшие - стерни.

Поскольку при неизменных прочих переменных с возрастанием плотности почвы коэффициент буксования уменьшается, соответственно, уменьшается и крюковая нагрузка. Поэтому предположим, что параметры k_i=$k_i(\bar{\rho}_i)$, аппроксимируются нелинейной (параболи-ческой) функцией:

$$k_i = g_i(p) = C_{0i} + C_{1i}p + C_{2i}p^2, \qquad (8)$$

где C_{0i}, C_{1i}, C_{2i} эмпирические коэффициенты.

Оценить их можно, воспользовавшись, например, результатами испытаний колесных тракторов, приведенными в [12].

Отметим: при записи зависимостей (5) - (8) учитывается то, что, когда МТА движется прямолинейно по слою рыхлой почвы, находящемся на твердом подслое, либо по верхнему слою твердой (плотной) почвы, коэффициент буксования будет меньше, чем при движении по рыхлой почве, (свежевспаханному полю).

Если угол поворота передних колес трактора мал ($\alpha_0 \approx 0$), МТА движется со средней скоростью v=1.5 м/сек ($\tilde{v}$=1.5), то коэффициенты C_{0i}, C_{1i}, C_{2i} удовлетворяют следующему уравнению:

$$C_{0i} + C_{1i}p + C_{2i}p^2 = 3\delta_i \qquad (9)$$

Полагая в (9) p=0.5,1.0,1.5 (P_{kr}=5,10,15 кН), определяя δ_1=(0.18,0.2,0.38), δ_2=(0.28,0.30, 0.43), δ_3=(0.21,0.23,0.28) с применением названных результатов испытаний, найдем:

C_{01}=0.96, C_{11}=-1.32, C_{21}=0.96 (слежавшаяся пахота);

C_{02}=1.12, C_{12}=-0.90, C_{22}=0.68 (свежевспаханное поле);

C_{03}=0.58, C_{13}=-0.70, C_{23}=0.50 (стерня).

Когда некий гипотетический агрофизический фон обладает свойствами, средними по отношению к рассматриваемым, для оценки соответствующих коэффициентов аппроксимации вида (8) можно использовать средние значения

$$\bar{C}_0=0.77,\ \bar{C}_1=-0.74,\ \bar{C}_2=0.58.$$

Располагая выражениями для a_i, b_i, k_i в соотношение (5), для определения δ_i получим формулу:

$$\delta_i = \delta_i(\tilde{\alpha},\tilde{v},p) = (\xi_{0i} + \xi_{1i}p + \xi_{2i}p^2)\tilde{v} \qquad (10)$$

Здесь коэффициенты $\xi_{0i} = \xi_{0i}(\tilde{\alpha}_0) = \zeta_i C_{0i}$, $\xi_{1i} = \xi_{1i}(\tilde{\alpha}_0) = k_0\tilde{\alpha}_0 + \zeta_i C_{1i}$, $\xi_{2i} = \xi_{2i}(\tilde{\alpha}_0) = \zeta_i C_{2i}$; параметр $\zeta_1 = \zeta_i(\tilde{\alpha}_0) = \delta_0 + \tilde{\alpha}_0 f_{i0}$.

Поскольку в соответствии с (1) безразмерная нормативная скорость $\tilde{v} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0}$ будет:

$$\tilde{v} = 0.1\gamma_k(1-\delta) \quad (\gamma_k = \frac{\beta_k}{(\bar{v}_0 i_T)}) , \qquad (11)$$

то уравнение для отыскания её с учетом (10) примет вид:

$$\tilde{v} = 0{,}1\gamma_k(1-(\xi_{0i} + \xi_{1i}p + \xi_{2i}p^2)\tilde{v}). \qquad (12)$$

Отсюда скорость:

$$\tilde{v} = \tilde{v}(\tilde{\alpha}, p) = \frac{0.1\gamma_k}{(1+0.1\gamma_k(\xi_{0i} + \xi_{1i}p + \xi_{2i}p^2))} . \qquad (13)$$

Считая соотношения (10) - (13) математической моделью технического объекта, как и в работах [18, 19, 20], воспользуемся методами производственной оптимизации таких объектов. Поскольку имеет место т.н. параметрическая оптимизация, примем в качестве критерия оптимальности (целевой функции) выражение (13), варьируемого параметра - безразмерную крюковую нагрузку p.

Обратимся далее и вопросам оптимизации движения МТА при маневрировании. Предположим, как и ранее, что маневрирование осуществляется на горизонтальной почве однородного состава и структуры. При этом различают гоновой, круговой и диагональный способы движения агрегата. Рассматривая, преимущественно, круговой способ движения, отметим, что процесс поворота МТА состоит, в общем, из этапов перехода от прямолинейного движения к криволинейному с постепенным уменьшением радиуса кривизны траектории (вход в поворот), последующего движения с постоянным радиусом кривизны (равномерный поворот) и этапа возвращения к прямолинейному движению (выход из поворота). Следует также иметь в виду, что при повороте МТА с колесным трактором, с одной стороны; крюковая нагрузка может уменьшаться, если, например, навесные орудия устанавливаются в транспортное положение. С другой стороны, в силу торможения повернутых передних колес, велика вероятность, что ведущие колеса трактора будет буксовать, возможно даже больше, чем при прямолинейном движении.

Принято при оценке маневренности МТА выделять в качестве основных следующие показатели:

- радиус поворота агрегата; при этом различают действительный R и геометрический R_g радиусы поворота МТА ($R_g = \frac{L}{tg\alpha_0}$, L - продольная база трактора); коэффициент поворачиваемости агрегата

$$k_r = \frac{R}{L}tg\alpha_0 \approx \frac{\bar{\alpha}_0 R}{L} \quad (\bar{\alpha}_0 = \frac{2\pi\alpha_0}{360^o}) ;$$

- угол поворота α_0 передних колес трактора (безразмерный нормированный угол поворота $\tilde{\alpha}_0 = \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_{00}}$);

- линейная скорость v_R равномерного движения МТА по окружности радиуса R (безразмерная нормированная окружная скорость $\xi_R = \frac{v_R}{v_0\bar{v}_0}$);

- смещение МТА относительно прямолинейного пути (курса) агрегата.

В результате полевых испытаний маневренности МТА на базе колесного трактора установлено, что коэффициент поворачиваемости k_R соответствующего агрегата зависит от безразмерной крюковой нагрузки p следующим образом [12]:

$$k_R = \frac{B_0 + B_1p + B_2p^2}{D_0 + D_1p + D_2p^2} . \qquad (14)$$

В выражении (14), в свою очередь, величина коэффициентов B_0, B_1, B_2; D_0, D_1, D_2 определяется безразмерными значениями угла поворота $\bar{\alpha}_0$ передних колес трактора, окружной скорости агрегата ξ_R, а также свойствами агрофизического фона, значениями других показателей. Установление всех закономерностей в достаточно полном объеме представляет большие трудности. Поэтому ограничимся случаем, когда зависимость $k_R = k_R(p)$ представляется в виде:

$$k_R = k_R(p) \approx R_0 + R_1p + R_2p^2 + R_3p^3 \qquad (15)$$

где коэффициенты R_0, R_1, R_2, R_3 данной степенной аппроксимации зависят лишь от $\bar{\alpha}_0$, ξ_R, и свойств агрофизического фона (слежавшаяся пахота, свежевспаханное поле, стерня и др.); изменение коэффициентов поворачиваемости МТА характеризуют результаты испытаний, приведенные в работах [8,12].

Из них видно, что в случае слежавшейся пахоты, свежевспаханного поля зависимость коэффициента поворачиваемости от крюковой нагрузки P_{kr} ($0 < P_{kr} < 10кН$) явно нелинейна, особенно при $P_{kr}<5кН$. Однако при испытаниях на стерне нелинейность проявляется в меньшей степени, следовательно, коэффициенты R_2, R_3 в (15) малы. Более того, при неизменных прочих параметрах с увеличением крюковой нагрузки во всех случаях коэффициент поворачиваемости МТА возрастает.

Влияние относительно небольшого изменения линейной окружной скорости агрегата v_R на коэффициент поворачиваемости незначительно, в большей степени заметно только при больших крюковых нагрузках. Наоборот, действительный радиус поворота МТА при изменении угла поворота передних колес трактора в диапазоне, например, от 14° до 27° зависит от величины α_0 существенно. Так при крюковой нагрузке 5.0 кН, углах поворота $\alpha_0 = 14^\circ, 20^\circ, 27^\circ$ действительный радиус поворота МТА R на слежавшейся пахоте, соответственно, будет, приблизительно, 10.8, 6.2, 5.3 м. Радиус поворота, естественно, увеличивается с уменьшением угла α_0. При этом коэффициент поворачиваемости агрегата

$$k_R = \frac{\bar{\alpha}_0 R}{L} = 0.39, 0.35, 0.38 (L \approx 7.0м) \ ,$$

т.е. меняется сравнительно мало.

Таким образом, в последующем можно использовать значения коэффициентов R_0, R_1, R_2, R_3 в соотношении (12) для k_R, полученных в результате обработки экспериментальных данных при средних значениях углов поворота передних колес трактора и окружных скоростях движения МТА, но зависящих от свойств агрофизического фона.

Далее, принимая во внимание сказанное, воспользуемся для оценки безразмерной оркружной скорости $\xi_R = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0}$ равномерного движения МТА при повороте аппроксимацией вида (13), упростив которую, запишем:

$$\xi_R = \xi_R(p) = \xi_0 + \xi_1 p + \xi_2 p^2 + \xi_3 p^3 \qquad (16)$$

где при сравнительно малых значениях крюковой нагрузки $p(p<1)$ коэффициенты $\xi_0 = 1 - 0.1\gamma_k(1-0.1\gamma_k)\xi_{0i}$, $\xi_1 = - 0.1\gamma_k(1-0.2\gamma_k\xi_{0i})\xi_{1i}$, $\xi_2 = - 0.1\gamma_k(1-0.2\gamma_k\xi_{0i})\xi_{2i}$, $\xi_3 = 0.02\gamma^2{}_k\xi_{1i}\xi_{2i}$.

Если, кроме того, параметр γ_k, характеризующий безразмерную линейную скорость вращения ведущих колес трактора мал ($\gamma_k <1$), то $\xi_0 \approx 1 - 0.1\gamma_k\xi_{0i}$, $\xi_1 \approx -0.1\gamma_k\xi_{1i}$, $\xi_2 \approx 1 - 0.1\gamma_k\xi_{2i}$, $\xi_3 \approx 0$.

Эти коэффициенты достаточно просто выражаются через эмпирические параметры C_{0i}, C_{1i}, C_{2i}, (см. соотношение (10)).

В случае, когда величины γ_k, ξ_{0i}, ξ_{1i}, ξ_{2i}, определяющие коэффициенты ξ_0, ξ_1, ξ_2, ξ_3 зафиксированы, нетрудно убедиться, имея в виду зависимость (13), что с увеличением крюковой нагрузки безразмерная окружная скорость $\xi_R(p)$ движения МТА уменьшается. Данное обстоятельство, а также отмеченная выше обратная закономерность изменения коэффициента поворачиваемости агрегата $k_R(p)$, позволяют надеяться, что воспользовавшись обобщенным критерием, включающем оба эти показателя, можно определить оптимальное значение безразмерной крюковой нагрузки p_m при маневрировании МТА.

Следуя имеющимися в научно-технической литературе рекомендациям [12], запишем обобщенный критерий (целевую функцию) в виде:

$$Q = \frac{\beta_1 \xi_R(p)}{q_1} + \frac{\beta_2 k_R(p)}{q_2} \ , \qquad (17)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты, характеризирующие значимость показателей ξ_R, k_R (весовые коэффициенты), такие, что $\beta_1 + \beta_2 = 1$; параметры q_1, q_2 - соответственно, наихудшая (наименьшая) безразмерная скорость движения агрегата ($q_1 \neq 0$) и предельно допустимый коэффициент поварачиваемости МТА ($q_2>0$). Эти параметры задаются экспертно.

Результаты и обсуждения. Основываясь на приведенных в предыдущем разделе материалах, применяя названные методы, рассмотрим последовательно оптимизационные задачи о прямолинейном и круговом движении МТА. В первом случае, так как ограничения на безразмерную скорость v отсутствуют, для отыскания оптимальных решений продифференцируем выражение (13) по параметру p. Приравнивая первую производную нулю, с учетом формулы (10), найдем оптимальное значение безразмерной крюковой нагрузки $p=p_m$ при прямолинейном движении МТА:

$$p_m = \frac{-0.5\xi_{1i}}{\xi_{2i}} = \frac{-0.5(\bar{k}_0\tilde{\alpha}_0 + \zeta_i C_{1i})}{\zeta_i C_{2i}} \ , \qquad (18)$$

согласно которого при малых углах поворота передних колес трактора, приблизительно,

$$p_m \approx \frac{-0.5 C_{1i}}{C_{2i}} \ . \qquad (19)$$

Таким образом, величина оптимальной крюковой нагрузки определяется, преимущественно, зависимостью коэффициента буксования трактора от механических свойств агрофизического фона (верхнего обрабатываемого слоя почвы).

При этом безразмерная оптимальная скорость v_m (см. соотношение (13)) прямолинейного движения машинно-тракторного агрегата будет:

$$\tilde{v}_m = \frac{0.1\gamma_k}{(1 + 0.1\gamma_k(\xi_{0i} + \xi_{1i} p_m + \xi_{2i} p_m^2))} \ .$$

В простейшем случае, когда угол поворота передних колес трактора мал, оптимальная скорость агрегата

$$\tilde{v}_m = \frac{0.1\gamma_k}{(1+0.033\gamma_k k_{im}(p_m))},$$

где $k_{im} = C_{0i} + C_{1i}p_m + C_{2i}p^2_m$ - значение параметра k_i в случае оптимальной крюковой нагрузки.

При замене в этом соотношении величины k_{im} на осредненное значение $k_m = C_0 + C_1p_m + C_2p^2_m$ размерную оптимальную скорость прямолинейного движения МТА можно оценить с помощью выражения:

$$v_m \approx \frac{0.1nr_k}{\sigma_m i_T} \quad (\sigma_m = 1 + 0{,}033\gamma_k\bar{k}_m). \qquad (20)$$

В формуле (20) коэффициент σ_m заведомо больше единицы, он зависит от безразмерных параметров $\gamma_k = \frac{\beta_k}{(\bar{v}_0 i_T)} = \frac{nr_k}{v_0\bar{v}_0 i_T}$ и $\bar{k}_m$.

Если обратиться вновь к названному гипотетическому агрофизическому фону, то согласно оценок (18), (19) оптимальная безразмерная крюковая нагрузка

$$p_m = \bar{p}_m = \frac{-0.5\bar{C}_1}{\bar{C}_2} \approx 0.65 \ (\mathrm{P_{kr}} = 6{,}5\text{кН}),$$

средняя размерная оптимальная скорость прямолинейного движения МТА ($k_m = 0{,}54$)

$$\bar{v}_m \approx \frac{v_T}{1+0.03\theta_k}, \qquad (21)$$

где безразмерная скорость $\theta_k = \theta_k(v_T) = \frac{\omega_k}{v_0}$

$\omega_k = \frac{nr_k}{i_T}$, v_0 – характерная скорость ($v_0 = 1.5$ м/сек), $v_T = 0{,}1w_k$ - размерная теоретическая скорость (4).

Очевидно, что, когда свойства реального агрофизического фона близки к свойствам гипотетического, предельно простую формулу (21) можно также использовать для приближенных расчетов оптимальной скорости агрегатов и в этом случае.

Данные результаты оптимизации нетрудно представить графически. Так оптимальная размерная крюковая нагрузка P_{krm} при прямолинейном движении МТА по слежавшейся пахоте, свежевспаханному полю, стерне и полю с осредненными агрофизическими свойствами, соответственно, будет 6.9, 6.6, 5.9, 6.5 кН. В виде диаграммы эти результаты показаны на рис. 1. Зависимость оптимальной размерной скорости движения агрегата v_m по полю с осредненными агрофизическими показателями от безразмерного параметра θ_k иллюстрирует рис. 2.

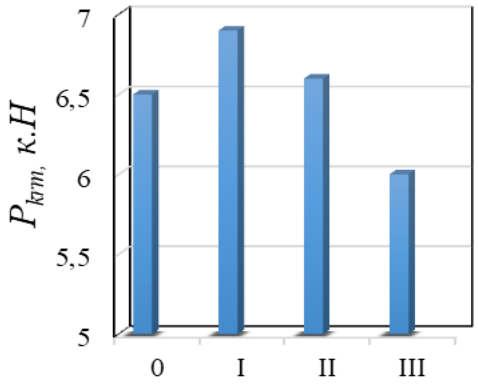


Рис.1- Агрофизический фон:
0 – гипотетический; I – слежавшаяся пахота; II – свежевспаханное поле; III – стерня

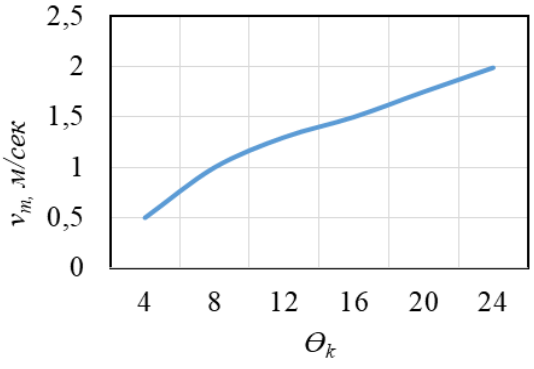


Рис. 2 – Зависимость оптимальной скорости движения МТА от параметра Θ_k

В рассматриваемом случае при определении режимов движения агрегата на практике следует, вначале, оценить оптимальную крюковую нагрузку. В основном, она определяется показателями агрофизического фона почвы. В отсутствие таковых необходимо обратиться к научно-технической литературе, возможно также применение методов интерполяции и экстраполяции. Далее рассчитывается оптимальная скорость движения МТА с использованием, по-прежнему, агрофизических показателей. Однако, в дополнение к ним, надо задать, учитывая особенности, специфику эксплуатации тракторов, теоретическую скорость движения их.

При маневрировании МТА, круговым движением агрегатов, дифференцируя соотношение по р, приравнивая производную нулю, получим для отыскания оптимального значения $p = p_m$ уравнение:

$$\chi_2 p^2 + 2\chi_1 p + \chi_0 = 0. \qquad (22)$$

Решение уравнения (22) имеет вид:

$$p = p_m = \frac{(-\chi_1 \pm \sqrt{\chi_1^2 - \chi_0\chi_2})}{\chi_2},$$

где коэффициенты $\chi_0 = \frac{\beta_1\xi_1}{q_1} + \frac{\beta_2 R_1}{q_2}$,

$\chi_1 = \frac{\beta_1\xi_2}{q_1} + \frac{\beta_2 R_2}{q_2}$, $\chi_2 = 3(\frac{\beta_1\xi_3}{q_1} + \frac{\beta_2 R_3}{q_2})$.

В простейшем случае ($\xi_3 \approx 0$, $R_3 \approx 0$, $\chi_2 \approx 0$)

$$p = p_m \approx \frac{-0.5\chi_0}{\chi_1} \approx -0.5\bar{\xi}(1 - (\frac{\bar{q}}{\bar{\beta}})(\frac{R_2}{\xi_2} - \frac{R_1}{\xi_1})). \qquad (23)$$

Здесь $\bar{\beta} = \frac{\beta_1}{\beta_2}$, $\bar{q} = \frac{q_1}{q_2}$; значение

$$\bar{\xi} = \frac{\xi_1}{\xi_2} \approx \frac{C_{1i}}{C_{2i}}$$

которое согласно (18), (19) при близком к прямолинейному движении МТА по модулю равняется удвоенной оптимальной безразмерной крюковой нагрузке; ξ_1, ξ_2 - коэффициенты разложения функции $\xi_R = \xi_R(p)$, оцениваются с помощью соотношений, приведенных в аппроксимации (16). Коэффициенты R_1, R_2 разложения показателя k_R в ряд по p (зависимость (15)) с использованием результатов испытаний МТА [12] можно оценить следующим образом.

При маневрировании МТА по слежавшейся пахоте, свежевспаханному полю, стерне выберем в качестве контрольных значения безразмерной крюковой нагрузки p=0.0, 0.5, 0.75. Учитывая, что в рассматриваемом диапазоне изменения угла поворота передних колес трактора коэффициент поворачиваемости меняется слабо, найдем для каждого из названных видов агрофизического фона среднюю величину коэффициента поворачиваемости при средней окружной скорости v = 1,5м/сек и выделенных нагрузках:

k_{R1} = (0.50, 0.54, 0.58) - слежавшаяся пахота;

k_{R2} = (0.55, 0.58, 0.61) - свежевспаханное поле;

k_{R3} = (0.44, 0.49, 0.55) - стерня.

Отсюда, если R_3 = 0, то при движении МТА по слежавшейся пахоте, свежевспаханному полю, стерне коэффициенты R_0, R_1, R_2, соответственно, будут: R_0 = (0.50, 0.52, 0.44), R_1 = (0.02, 0.04, 0.06), R_2 = (0.12, 0.08, 0.08).

Как и выше, в случае, когда маневрирование МТА осуществляется на почве с гипотетическими (средними) свойствами, средние коэффициенты R_0 = 0.50, R_1 = 0.04, R_2 = 0.09.

При этом в выражении (23) для оптимальной крюковой нагрузки

$$\bar{\xi} \approx \frac{-0.5\bar{C}_1}{\bar{C}_2},$$

$\xi_1 \approx -0.1\gamma_k \cdot (\bar{\chi}_0\bar{\alpha} + \bar{\zeta}\bar{C}_1)$, $\xi_2 \approx -0.1\gamma_k \cdot \bar{\zeta}\bar{C}_2$); $\bar{\alpha}$ = 0,75 - средний безразмерный угол поворота передних колес трактора $\bar{\zeta} = \bar{\delta}_0 + \bar{\alpha}\bar{f}_0$ = 0,4 - среднее значение множителей ξ_i, $\gamma_k = \frac{\theta_k}{\bar{v}_0}$

Соответственно, оптимальная безразмерная средняя крюковая нагрузка при маневрировании

$$\bar{p}_m \approx 0.65(1 + 2.7(\frac{H}{\theta_k})(1 + \frac{3.3}{1+\bar{\alpha}})), \qquad (24)$$

где $H = \frac{\bar{q}}{\bar{\beta}}$ - величина, которая, по существу, характеризует при оптимизации движения МТА значимость окружной скорости, коэффициента поворачиваемости; $\bar{\alpha}$- представляет собой безразмерный нормированный угол поворота передних колес трактора; $\theta_k = 10\bar{v}_T$, $\bar{v}_T = \frac{v_T}{v_0}$, ($v_0$ = 1,5 м/сек) - безразмерная теоретическая скорость движения агрегата.

Наконец, подставляя в соотношение (15) значение оптимальной безразмерной величины крюковой нагрузки p_m, определяемое с помощью формулы (23), или среднюю крюковую нагрузку $\bar{p}_m$ (24), найдем величину оптимального коэффициента поворачиваемости МТА k_{Rm}, среднего коэффициента поворачиваемости $\bar{k}_{Rm}$ при маневрировании МТА на почве со средним агрофизическим фоном. В последнем случае:

$K_m = \bar{k}_{Rm} = \bar{R}_0\bar{p}_m + \bar{R}_2\bar{p}^2 \approx 0.50 + \bar{p}_m (0.04 + 0.09\,\bar{p}_m)$. (25)

В данной оптимизационной задаче, как и предыдущей (прямолинейное движение МТА), вначале определим оптимальную крюковую нагрузку p_m при условии, что заданы параметры β_1, β_2, означающие значимость (вес) безразмерной окружной скорости ξ_R и коэффициента поворачиваемости агрегата k_r, а также характерные величины q_1, q_2,

соответственно, круговой скорости и коэффициента поворачиваемости агрегата. Пусть $\beta_1 = 0.4$, $\beta = 0.6$; $q_1 = 0.5$, $q_2 = 1.5$; отсюда $\bar{\beta} = 0.67$, $\bar{q}_1 = 0.33$, $H = 0.5$.

Ограничиваясь только случаем маневрирования МТА на почве со средними агрофизическими свойствами, воспользовавшись формулой (24), оценим изменение оптимальной размерной крюковой нагрузки P_{krm} в зависимости от параметра Θ_k, характеризующего теоретическую скорость трактора v_T. Из рис. 3 видно, что с увеличением Θ_k, а значит и теоретической скорости, величина P_{krm} уменьшается по закону, близкому к гиперболическому. В выделенном интервале изменяется Θ_k, приблизительно, в 1.7 раза.

Влияние этого же параметра Θ_k на оптимальный коэффициент поворачиваемости МТА $K_m = \bar{k}_{km}$ иллюстрирует рисунок 4. Ожидаемо, что при возрастании Θ_k коэффициент $\bar{k}_{km}$ уменьшается, т.е. появляется возможность уменьшить действительный радиус поворота агрегата, сократить время маневрирования.

Итак, на практике (в полевых условиях) оператор, инженер, возможно, исследователь должны, как было отмечено выше, выбрать необходимую теоретическую скорость движения агрегата, задать характерные величины q_1, q_2; веса β_1, β_2, означающие значимость показателей ξ_R и k_k при маневрировании. Затем следует рассчитать оптимальную крюковую нагрузку P_m с помощью формулы (23) или (24). Можно, разумеется, воспользоваться рисунком 3. В завершение, с использованием формул (16), (25) при оговоренных условиях, определяется оптимальная окружная скорость, коэффициент поворачиваемости МТА.

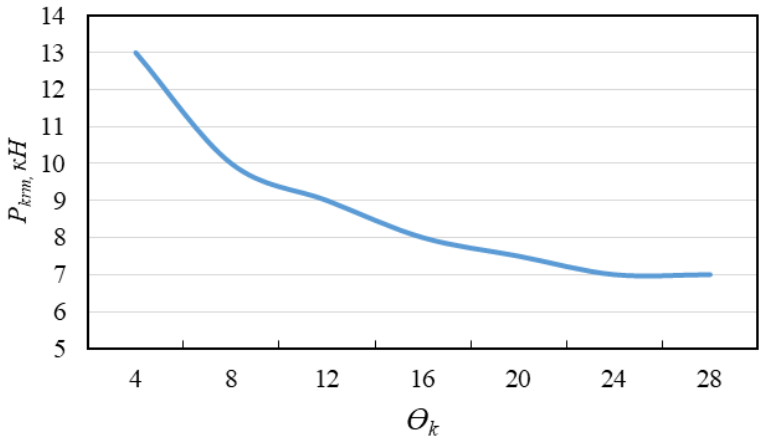


Рис. 3 – Зависимость оптимальной крюковой нагрузки от параметра Θ_k

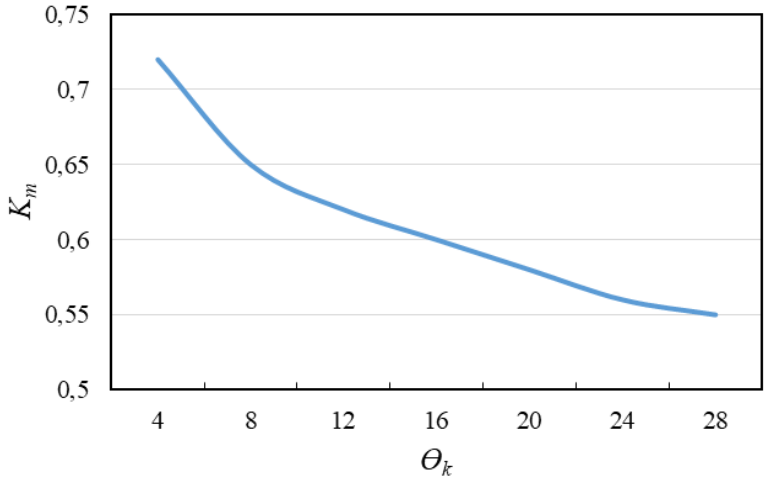


Рис. 4 – Зависимость оптимального коэффициента поворачиваемости МТА от параметра Θ_k

Выражение (25), в сочетании с (24), наглядно иллюстрирует изменение оптимального коэффициента поворачиваемости, а значит и радиуса поворота МТА, в зависимости от скорости движения, угла поворота передних колес трактора: с увеличением скорости, угла поворота величина оптимального радиуса поворота МТА уменьшается. Другими словами, в случае необходимости уменьшения радиуса поворота, скорость движения МТА, угол поворота передних колес транспорта можно увеличить (разумеется, в пределах разумного).

Например, при прямолинейном движении МТА в теплое время года по почве со средними агрофизическими показателями оптимальная крюковая нагрузка равняется 6.5 кН, а оптимальная скорость будет меньше теоретической скорости агрегата, приблизительно, в 1.2 раза. В случае маневрирования МТА установлено, что с увеличением теоретической скорости агрегата величина оптимальной крюковой нагрузки уменьшается. Следовательно, увеличивая скорость кругового движения МТА, величину крюковой нагрузки необходимо уменьшать.

В целом, полученные соотношения, установленные закономерности частично подтверждают известные, что говорит об их достоверности. С другой стороны, они представляют возможность количественной оценки влияния свойств почвы на выбор оптимальных режимов обработки ее.

К сожалению, непосредственно сравнить данные оптимальные решения с имеющимися в научно-технической литературе сложно, поскольку, например, известные выражения для расчета оптимальной скорости прямолинейного движения МТА содержит показатель, характеризующий максимальный КПД трактора, который в полученных соотношениях не содержится, при проведении полевых испытаний не определялся. Более того, результаты оптимизации режимов маневрировании МТА нам не известны.

Таким образом, в рамках теоретико-экспериментального подхода с использованием методов математического моделирования, производственной оптимизации, результатов полевых испытаний прямолинейного и кругового движения машинно-тракторных агрегатов, получены соотношения для расчета оптимальной крюковой нагрузки, скорости прямолинейного движения, коэффициента поворачиваемости при маневрировании агрегатов. Научная новизна и, вместе с тем, значимость этих соотношений состоит в том, что они содержат параметры, характеризующие агрофизические свойства почвы.

Выводы. В результате выполнения работы с применением методов математического моделирования, производственной оптимизации, когда часть зависимостей является аппроксимацией имеющихся в научно-технической литературе экспериментальных данных (теоретико-экспериментальный подход) достигнута поставленная цель по оптимизации режимов движения машинно-тракторных агрегатов. Установлены конкретные количественные зависимости: для прямолинейного движения МТА оптимальная крюковая нагрузка составляет 6.5 кН, а скорость движения – 1.25 от теоретической скорости агрегата. Для основных типов агрофонов оптимальная нагрузка варьируется от 5.9 кН (стерня) до 6.9 кН (слежавшаяся пахота). При маневрировании МТА доказано, что увеличение теоретической скорости на 70% приводит к снижению оптимальной крюковой нагрузки на 25-30% по гиперболическому закону, при одновременном уменьшении коэффициента поворачиваемости на 15-20% и, соответственно, радиуса поворота агрегата.

Практическая значимость результатов заключается в возможном применении полученных соотношений при проектировании систем автоматизированного управления МТА и разработке рекомендаций по эксплуатации тракторов в различных почвенных условиях. Данные аналитические зависимости позволяют количественно оценить влияние агрофизических свойств почвы на энергоэффективность агрегатов, также могут быть использованы при создании алгоритмов оптимального выбора режимов обработки почвы. Согласно этим соотношениям рекомендуется при прямолинейном движении устанавливать крюковую нагрузку 6.5-6.9 кН в зависимости от типа почвы, а при маневрировании – снижать нагрузку пропорционально квадрату скорости движения МТА.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются учет динамических свойств почвы и климатических факторов в оптимизационных моделях, разработка методов адаптивного управления МТА в режиме реального времени, а также решение задач оптимизации в условиях неопределенности параметров агрофона.

Литература

1. К согласованию кинематических характеристик поворота колёсной машины / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина, А. Н. Брюховецкий, И. А. Высоцкая // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13 № 3(66). С. 12-18. doi: 10.17238/issn2071-2243.2020.3.12.

2. Новиков В. В., Поздеев А. В. Влияние угловой демпфирующей связи на колебания трехосной двухсекционной бесподвесочной колесной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 4. С. 54-61. doi: 10.31992/0321-4443-2019-4-54-61.

3. К формированию модели эффективности функционирования сельскохозяйственного трактора в составе МТА при работе на альтернативных видах топлива / А. А. Глущенко, И. Р. Салахутдинов, А. К. Субаева, Калимуллин М.Н. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19 № 1(73). С. 42-47. doi: 10.12737/2073-0462-2024-42-47.

4. Анализ кинематики навесного устройства трактора с регулируемыми характеристиками / С. М. Яхин, Ф. Х. Халиуллин, А. З. Имамиев, А.В. Матяшин, С.В. Егоров // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 17-2. С. 250-259. doi: 10.26160/2658-3305-2022-17-250-259.

5. Анализ современных конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин и агрегатов / С. В. Малюков, Е. В. Поздняков, М. В. Шавков, А.Ф. Петков, И.И. Шанин, А.В. Белгов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2 (70). С. 523-534. – doi: 10.32786/2071-9485-2023-02-61.

6. Лопарев А. А., Новиков К. В., Комкин А. С. Исследование процесса сопротивления качению сельскохозяйственных тракторов-Киров: ООО Издательство Радуга-ПРЕСС", 2021. 202 с.–ISBN 978-5-6044635-9-8.

7. Валиев А. Р., Матвеев И. Н., Щитов С. В. Снижение полных энергозатрат за счет повышения устойчивости движения агрегата // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 3 (37). С. 72-76. doi: 10.12737/14760.

8. Лопарев А.А. Буксование ведущих колес трактора МТЗ-80 и свойства почвы // Земледелие. 2002. №3. С.23-24.

9. Гапич Д. С., Привалов В. А. Прогнозирование тягово-сцепных показателей колесных тракторов при динамическом характере крюкового усилия // Известия МГТУ МАМИ. 2016. № 4(30). С. 20-24.

10. Особенности применения современного тракторного транспорта в технологических процессах по возделыванию сельскохозяйственных культур / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, И. А. Успенский и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 126. С. 180-198. doi: 10.21515/1990-4665-126-013.

11. Оптимизация параметров многофункционального пахотного агрегата / Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина, В. В. Цыбулевский, В. В. Вовк // Colloquium-Journal. 2018. № 6-1(17). С. 62-65.

12. Фасхутдинов М. Х., В. Л. Федяев. Гусенично-колесные движители универсально-пропашных тракторов. Проблемы и перспективы Казань: Академия наук РТ, 2021. 304 с. ISBN 978-5-9690-0891-5.

13. Бледных В. В., Свечников П. Г. Оптимизация рабочих органов, конструктивной схемы и параметров орудия // Агропродовольственная политика России. 2015. № 1(37). С. 7-11.

14. Optimization of plow adjustment / D. T. Khaliullin, A. Belinsky, A. R. Valiev, Lukmanov R.R., Bourges G. // Bio web of conferences 2020. P. 000103. doi: 10.1051/bioconf/20202700103.

15. Оптимизация энергетических и экономических показаний комбинированного агрегата / А. Р. Валиев, Г. С. Юнусов, А. А. Мустафин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 3(41). С. 72-78. doi: 10.12737/22680.

16. Optimization of main parameters of tractor and unit for seeding cereal crops with regards to their impact on crop productivity / R. Khafizov, C. Khafizov, A. Nurmiev, I. Galiev // Engineering for Rural Development: Proceedings. 2018. Vol. 17. P. 168-175. doi: 10.22616/ERDev2018.17. N192.

17. Optimization of main parameters of tractor and unit for plowing soil, taking into account their influence on yield of grain crops / C. Khafizov, R. Khafizov, A. Nurmiev, I. Galiev // Engineering for Rural Development: 2020. P. 585-590. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF131.

18. Акулин Е. В., Свиридова Л. Е. Применение математического моделирования в науке и технике // Вестник науки. 2021. Т. 2. № 3(36). С. 123-127.

19. Тяговое сопротивление секции чизельного плуга с рабочими органами различной геометрической формы / С. Д. Фомин, Д. С. Гапич, С. И. Субботин, Ю. А. Швабауэр // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 2(74). С. 358-367. doi: 10.32786/2071-9485-2024-02-42.

20. Ибятов Р. И., Зиганшин Б. Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1(65). С. 50-55. doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.

Сведения об авторах:

Федяев Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: vlfed2020@gmail.com

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.

Галимов Энгель Рафикович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, сварки и производственной безопасности, e-mail: ERGalimov@kai.ru

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия.

Ахметзянов Ришат Ринатович – кандидат технических наук, доцент кафедры общеинженерных дисциплин, e-mail: rishat83@mail.ru

Вагизов Тагир Наилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры общеинженерных дисциплин, e-mail: toha-174@mail.ru

Пикмуллин Геннадий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общеинженерных дисциплин, e-mail: pikmullin@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

OPTIMIZATION OF SOIL CULTIVATION MODES WITH MACHINE-TRACTOR UNITS

V. L. Fedyaev, E. R. Galimov, R. R. Akhmetzyanov, T. N. Vagizov, G. V. Pikmullin

Abstract. The objective of this study is to determine the optimal hook load and travel speed of machine-tractor units based on wheeled tractors to improve soil cultivation efficiency. This work is based on a theoretical and experimental approach combining mathematical modeling and production optimization methods with verification using field test data. Field tests were conducted at Kazan State Agrarian University and Kirov Institute of Agricultural Sciences from 1990 to 2005. The study was conducted on typical agricultural conditions of Middle Volga region: compacted arable land (with a density of 1350-1415 kg/m3 and a moisture content of 13-15%), freshly plowed soil (1275-1315 kg/m3, 14-16%) and stubble (1475-1520 kg/m³, 12-14%). Standard and certified instruments were used: R 320 dynamometers, DFM-5 fuel consumption meters, and EIA-P and URDP-AFI devices. It was found that the optimal hook load for rectilinear movement of the machine-tractor unit is 6.5 kN for soil with average properties and the optimal travel speed is 1.25 times theoretical speed of the unit. The load varied for different agricultural backgrounds: 6.9 kN on compacted arable land, 6.6 kN on freshly plowed land and 5.9 kN on stubble. When maneuvering machine-tractor units, the optimal load decreases with increasing theoretical speed according to a hyperbolic law: a 70% increase in speed leads to a 25-30% decrease in load. The turning coefficient decreases by 15-20%, allowing for a smaller turning radius. The resulting relationships allow for a quantitative assessment of the impact of soil agrophysical properties on machine-tractor unit operating modes and can be used in the development of automated control systems for agricultural machinery.

Key words: machine-tractor units, linear motion, maneuvering, optimization, practical recommendations.

References

1. Belyaev AN, Trishina TV, Bryukhovetskiy AN, Vysotskaya IA. [On the coordination of kinematic characteristics of the turning of a wheeled vehicle]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.13. 3 (66). 12-18 p. doi: 10.17238/issn2071-2243.2020.3.12.
2. Novikov VV, Pozdeev AV. [Influence of the angular damping link on vibrations of a three-axle two-section non-suspension wheeled vehicle]. Traktory i selkhozmashiny. 2019; 4. 54-61 p. doi: 10.31992/0321-4443-2019-4-54-61.
3. Glushchenko AA, Salakhutdinov IR, Subaeva AK, Kalimullin MN. [Towards the formation of a model of operating efficiency of an agricultural tractor as part of an MTA when operating on alternative fuels]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 1 (73). 42-47 p. doi: 10.12737/2073-0462-2024-42-47.
4. Yakhin SM, Khaliullin FKh, Imamiev AZ, Matyashin AV, Egorov SV. [Analysis of the kinematics of a tractor hitch with adjustable characteristics]. Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo. 2022; 17-2. 250 -259 p. doi: 10.26160/2658-3305-2022-17-250-259.
5. Malyukov SV, Pozdnyakov EV, Shavkov MV, Petkov AF, Shanin II, Belgov AV. [Analysis of modern designs of combined tillage machines and units]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2023; 2(70). 523-534 p. – doi: 10.32786/2071-9485-2023-02-61.
6. Loparev AA, Novikov KV, Komkin AS. [Study of the rolling resistance process of agricultural tractors]. Kirov: OOO Izdatelstvo Raduga-PRESS. 2021; 202 p. – ISBN 978-5-6044635-9-8.
7. Valiev AR, Matveev IN, Shchitov SV. [Reduction of total energy consumption by increasing the stability of the unit's movement]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015; Vol.10. 3(37). 72-76 p. doi: 10.12737/14760.
8. Loparev AA. [Slipping of the drive wheels of MTZ-80 tractor and soil properties]. Zemledelie. 2002; 3. 23-24 p.
9. Gapich DS, Privalov VA. [Forecasting the traction and coupling indicators of wheeled tractors with a dynamic nature of the hook force]. Izvestiya MGTU MAMI. 2016; 4(30). 20-24 p.
10. Byshov NV, Borychev SN, Uspenskiy IA. [Features of modern tractor transport use in technological processes for agricultural crops cultivation]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017; 126. 180-198 p. doi: 10.21515/1990-4665-126-013.
11. Maslov GG, Yudina EM, Tsybulevskiy VV, Vovk VV. [Optimization of the parameters of a multifunctional plowing unit]. Colloquium-Journal. 2018; 6-1(17). 62-65 p.
12. Faskhutdinov MKh, Fedyaev VL. Gusenichno-kolesnye dvizhiteli universalno-propashnykh traktorov. Problemy i perspektivy. [Tracked-wheel movers of universal-row-crop tractors. Problems and prospects]. Kazan: Akademiya nauk RT. 2021; 304 p. ISBN 978-5-9690-0891-5.
13. Blednykh VV, Svechnikov PG. [Optimization of working units, design scheme and parameters of the implement]. Agroprodovolstvennaya politika Rossii. 2015; 1 (37). 7-11 p.
14. Khaliullin DT, Belinskiy A, Valiev AR, Lukmanov RR, Bourges G. Optimization of plow adjustment. Bio web of conferences. 2020; 000103 p. doi: 10.1051/bioconf/20202700103.
15. Valiev AR, Yunusov GS, Mustafin AA. [Optimization of energy and economic indicators of a combined unit]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; Vol.11. 3(41). 72-78 p. doi: 10.12737/22680.
16. Khafizov R, Khafizov C, Nurmiev A, Galiev I. Optimization of main parameters of tractor and unit for seeding cereal crops with regards to their impact on crop productivity. Engineering for Rural Development: Proceedings. 2018; Vol.17. 168-175 p. doi: 10.22616/ERDev2018.17. N192.
17. Khafizov C, Khafizov R, Nurmiev A, Galiev I. Optimization of main parameters of tractor and unit for plowing soil, taking into account their influence on yield of grain crops. Engineering for Rural Development: 2020; 585-590 p. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF131.
18. Akulin EV, Sviridova LE. [Application of mathematical modeling in science and technology]. Vestnik nauki. 2021; Vol.2. 3 (36). 123-127 p.
19. Fomin SD, Gapich DS, Subbotin SI, Shvabauer YuA. [Traction resistance of a chisel plow section with working units of different geometric shapes]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2024; 2(74). 358-367 p. doi: 10.32786/2071-9485-2024-02-42.
20. Ibyatov RI, Ziganshin BG. [On modeling random processes in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 1 (65). 50-55 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.

Authors:

Fedyaev Vladimir Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher, e-mail: vlfed2020@gmail.com

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Federal Research Center of Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.

Galimov Engel Rafikovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Materials Science, Welding and Industrial Safety, e-mail: ERGalimov@kai.ru

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Akhmetzyanov Rishat Rinatovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Engineering Disciplines, e-mail: rishat83@mail.ru

Vagizov Tagir Nailevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of General Engineering Disciplines Department, e-mail: toha-174@mail.ru

Pikmullin Gennadiy Vasilevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of General Engineering Disciplines Department, e-mail: pikmullin@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-130-138
УДК 636.3.035:677.3

СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ СЕКТОРОВ РОССИЙСКОГО ШЕРСТЯНОГО КОМПЛЕКСА

К. Э. Разумеев, Х. А. Амерханов, А. В. Медведев, Д. В. Сичевой

Реферат. Комплексный мониторинг состояния и экономической динамики секторов шерстяного комплекса России в условиях санкционного давления и структурной деформации рынка выявил критический диспаритет между высоким генетическим потенциалом отечественного овцеводства и несоразмерно низкой долей страны на мировом рынке шерстяного текстиля, объем которого в 2024 году превысил 39 млрд долларов США при ежегодном росте 3,2%. Установлено, что разрыв технологической цепочки на этапе первичной обработки приводит к экспорту сырья с низкой стоимостью и потере до 300-400% добавленной стоимости, формируемой зарубежными переработчиками. Текущая рентабельность производства шерсти при закупочных ценах 15-100 рублей за кг остается отрицательной без государственных субсидий, создавая реальную угрозу утраты генофонда 51 породы овец. Впервые в отечественной литературе представлена сравнительная экспертная оценка развитости секторов отрасли РФ и стран-лидеров, демонстрирующая критическое отставание отечественного сегмента сертификации и продаж, что автоматически дисконтирует экспортную цену российской шерсти на 20-30% из-за рисков качества. Экономическая эффективность внедрения непрерывной технологии «немытая шерсть – однопрочесная гребенная лента» без промежуточной сушки, позволяет сохранить физико-механические свойства волокна и увеличить выход конечной продукции на 2-2,5%. Доказана необходимость применения расчетных формул международного проекта TEAM для прогнозирования выхода пряжи. Стратегическими приоритетами развития шерстяного комплекса России включают создание индустриальных кластеров полного цикла в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах и запуск механизма биржевой торговли на базе обязательной сертификации. Предложенный подход обеспечит снижение логистических издержек на 15-20% и масштабное импортозамещение готовой текстильной продукции, трансформируя шерстяной комплекс из дотационного сырьевого сектора в драйвер легкой промышленности с высокой добавленной стоимостью.

Ключевые слова: овцеводство, шерстные породы, производство шерсти, первичная обработка, переработка шерсти, шерстяной комплекс, план мероприятий (дорожная карта).

Введение. За последние десятилетие агропромышленный комплекс России имеет устойчивые темпы развития, что подтверждается показателями, характеризующими обеспечение продовольственной безопасности. Современное состояние развития АПК страны определяется усилением государственной поддержки, которая в значительной мере позволяет совершенствовать материально-техническую базу его отраслей [1, 2], способствует внедрению цифровых решений в агропромышленное производство [3], более рациональному использованию имеющихся ресурсов [4, 5] и др., что в итоге привело к наращиванию экспортного потенциала АПК и более чем двукратного увеличения его объемов за последние десять лет [6, 7].

Шерстяной комплекс традиционно являлся значимым сегментом агропромышленного комплекса России, обеспечивая сырьем легкую промышленность, а также занятость в сельских регионах. Однако с начала 1990-х годов отрасль переживает глубокий системный кризис, приведший к резкому сокращению поголовья овец, деградации перерабатывающих мощностей и потере позиций как на внешнем, так и на внутреннем рынке.

До данным Росстата, по сравнению с 1990 годом к 2024 году производство шерсти в хозяйствах всех категорий уменьшилось с 226,7 тыс. т до 43,4 тыс. т, то есть более чем на 4/5 [8], тогда как производство шерстяных тканей в 1990 году составляло 466 млн. м^2, то за последние годы не превышает 7-8 млн. м^2.

Овцеводство исторически является одной из ключевых отраслей отечественного животноводства, однако его современное состояние характеризуется системным кризисом доходности. В отечественной практике овцеводство часто рассматривается изолированно, в то время как с экономической точки зрения его необходимо анализировать как начальное звено глобальной цепочки создания стоимости (Global Value Chain) текстильной индустрии. Его нельзя рассматривать (особенно, шерстное овцеводство) в отрыве от развития технологий первичной обработки и переработки шерсти. Авторами поставлена задача изучить основные тенденции всех секторов российского шерстяного комплекса, который последние 30-35 лет испытывает трудности не только технологического, но и структурно-экономического характера. Начиная с 1990-х в стране не было подготовлено и утверждено ни одного государственного документа, в котором бы были комплексно рассмотрены проблемы производства и переработки шерсти, а также намечены перспективы развития хотя бы на период 10-20 лет. Отсутствие системных государственных решений привело к разрыву межотраслевых связей, что сделало производство шерсти для многих хозяйств планово-убыточным направлением без учета субсидий.

Актуальность данного анализа усиливается глобальными трендами. По оценкам международных экспертов (IWTO), объем мирового рынка шерстяного текстиля в 2024 году превысил 39 млрд долл. США с прогнозируемым ежегодным ростом (CAGR) на уровне 3,2% [9]. При этом Россия, обладая значительным генетическим потенциалом, занимает в денежном выражении несоразмерно малую долю этого рынка, выполняя преимущественно роль поставщика сырья с низкой добавленной стоимостью, что требует пересмотра экономических моделей управления отраслью.

Цель исследования – комплексный мониторинг состояния и динамики секторов шерстяного комплекса России для выявления структурных диспропорций, сдерживающих его экономическое развитие, и обосновать необходимость перехода от сырьевой модели экспорта к индустриальной системе глубокой переработки, обеспечивающей сохранение добавленной стоимости внутри страны и повышение рентабельности отрасли.

Условия, материалы и методы. Методологической основой исследования послужил комплексный подход, сочетающий зоотехнический мониторинг с экономико-статистическим анализом. В отечественных научных публикациях в данной сфере, как правило, вопросы функционирования и развития овцеводства, первичной обработки и переработки шерсти авторами рассматриваются автономно, что зачастую приводит к одностороннему, неполному анализу объективно существующих технологических и экономических взаимосвязей. В отличие от традиционных работ мы применяем метод анализа сквозной технологической цепочки.

В зарубежной научной литературе уже несколько десятилетий принято использовать комплексный анализ и изучать основные факторы развития каждого из секторов шерстяного комплекса той или иной страны.

Термин «шерстяной комплекс» в отечественной научной литературе впервые был использован К.Э. Разумеевым [10] и далее получил серьезную поддержку в лице научно-образовательного сообщества, включая академиков В.А. Мороза, В.И. Трухачева [11, 12] и других видных ученых и практиков. Он рассматривается здесь как экономическая экосистема, включающая:

1. Сектор производства сырья (формирование себестоимости).
2. Сектор логистики и сертификации (подтверждение качества как фактора цены).
3. Сектор переработки (ПОШ и текстиль) (формирование добавленной стоимости).
4. Сектор ритейла (реализация конечному потребителю).

Использованы данные Росстата, ФТС России, международных аналитических агентств (IWTO), а также результаты собственных исследований авторов на предприятиях отрасли.

В материале делается попытка первичного анализа исполняемости уже утвержденных Правительством РФ документов в 2024-25 годы в части развития глубокой переработки шерсти.

Результаты и обсуждение. Опыт развития шерстяного дела в Австралии, Новой Зеландии, Великобритании, КНР, ЮАР и многих других странах мира в различные периоды привел к осознанной необходимости создания структур, охватывающих своим влиянием все секторы шерстяного комплекса (далее – ШК), которые связаны объективно существующими технологическими и экономическими процессами:

1. Сектор производства шерсти (по-иному именуемый – овцеводство, козоводство и др.);
2. Сектор контроля качества, сертификации и подготовки шерсти к продаже;
3. Сектор продажи шерсти (методы: биржа, аукцион и др.), послепродажной обработки и транспортировки шерсти;
4. Сектор первичной обработки шерсти (по различным технологиям);
5. Сектор переработки шерсти (различные технологии: камвольная, аппаратная и др.);
6. Сектор швейного, трикотажного, коврового производств и др.;
7. Сектор продажи готовых шерстяных изделий всех видов, включая и так называемые смесовые (с наличием иных натуральных и химических волокон).

В каждой стране, где занимаются производством, продажей, переработкой шерсти, развитие различных секторов ШК может иметь разную степень. Очень часто степень развития того или иного сектора и ШК страны в целом отражают приоритеты государственной политики и принятую государством стратегию развития экономики.

Приведенные в таблице 1 экспертные оценки степени развитости каждого из секторов шерстяного комплекса по странам мира впервые в таком объеме приводятся в отечественной литературе и подготовлены авторами на основе мониторинга основных источников мировой и отечественной статистики в данной сфере [9, 13, 14].

Анализ данных таблицы 1 позволяет выявить критический для экономики РФ структурный дисбаланс. Страны-лидеры (Австралия, Китай, Италия) контролируют либо начальные этапы с высокой биржевой стоимостью сырья (Австралия), либо этапы глубокой переработки с максимальной добавленной стоимостью (Китай, Италия). Россия же, имея средний уровень развития производства сырья, демонстрирует отставание в секторах сертификации и продаж. С экономической точки зрения это автоматически дисконтирует стоимость российской шерсти на мировом рынке на 30-50% по сравнению с аналогами, что формирует ежегодную упущенную выгоду отрасли в размере миллиардов рублей.

Таблица 1 – Степень развитости секторов шерстяного комплекса по странам мира

Страна мира	Производство шерсти	Сертификация	Продажа шерсти	ПОШ (все варианты)	Переработка (все виды)	Швейное, трикотажное и др.	Продажа готовых изделий
Австралия	***	***	***	*			
Новая Зеландия	***	***	***	***	**		*
Уругвай	**	***	***	**	*	*	*
ЮАР	***	***	***	***	*	*	*
Бразилия	**	**	**	**	*	*	*
Великобритания	***	***	***	***	***	***	***
Индия	**	***	***	***	***	***	***
Испания	**	***	***	***	***	***	***
Китай	**	***	***	***	***	***	***
Турция	***	***	***	***	***	***	***
Бельгия	*	*	*	***	***	***	***
Германия	*	**	**	***	***	***	***
Италия	*	**	**	***	***	***	***
Франция	**	***	***	***	***	***	***
США	**	**	***	***	***	***	***
Япония				**	**	**	**
Беларусь	*		*	**	***	***	***
Россия	**	*	*	**	*	**	**

Примечание: *** – высокая степень развитости сектора (мировой лидер); ** – средняя степень развитости сектора; * – низкая степень развитости сектора

Овцеводство в Российской Федерации в последние 35 лет пережило очень серьезный спад (период 1992-1998 годы), период компенсации и некоторого подъема (1999-2018 годы), в настоящее время (2020-2025 годы), к великому сожалению авторов, находится в периоде ежегодного снижения основных показателей, более того, ряд из поддерживаемых 51 пород овец находятся под серьезной угрозой исчезновения, что подтверждается показателями таблицы 2.

Таблица 2 – Породный состав и его динамика в период с 1990 по 2025 годы

Группы пород овец по классификации		Название породы	Численность поголовья овец в сельхозпредприятиях России, тыс. голов				
по типу шерстного покрова	по направлению продуктивности		1990	2000	2010	2020	2025 (пр.)
1	2	3	4	5	6	7	8
Тонкорунные	Шерстные	Артлухский меринос	-	-	-	7,5	9
		Грозненская	700	478	631	272	280
		Кулундинская	-	-	4,6	1,8	2
		Манычский меринос	75,0	48,7	33,1	25	19
		Сальская	110	39,8	11,2	2,1	3,5
		Сарпинская	-	-	-		9
		Советский меринос	1050	524,1	281,1	127	78
		Ставропольская	3700	635,4	348,3	64,6	30
		Черно-земельский меринос	-	-	-	21,6	21
		Южно-уральская	24,0	35,0	4,7	-	-

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
	Шерстно-мясные	Алтайская	2400	204,6	19,6	1,7	0,4
		Джалгинский меринос	-	-	-	11,0	11
		Забайкальская	3800	547,3	302,3	92,0	35
		Кавказская	3560	356,7	73,1	14,8	9
		Красноярская	2100	280,6	12,7	3,0	7
	Мясо-шерстные	Волгоградская	806	133,7	123,6	112	110
		Дагестанская горная	1400	400,6	732,5	909	1050
		Российский мясной меринос	-	-	-	-	5
Полутонко-рунные	Мясо-шерстные длинно-шерстные	Горьковская		1,0	0,7	0,5	0,2
		Куйбышевская	56	21,2	22,1	22	23
		Русская длинно-шерстная	148,0	56,7	11,2	2,2	2
		Северокавказская мясо-шерстная	61,9	56,7	39,6	16,0	12
		Советская мясошерст-ная	161	128,5	22,7	11,5	6
Полугрубо-шерстные	Мясо-шерстные коротко-шерстные	Горноалтайская		165	85,2	56,1	35
		Татарская		-	-	-	2
		Ташлинская		-	7,4	-	2,5
		Цигайская		177,8	99,7	27,7	16
		Южная мясная		-	5,2	6,0	7
		Агинская		-	20,3	20,3	-
		Бурятская		4,5	12,9	-	-
Грубошерст-ные (выделяются 15 пород и 8 породных типов)	Мясо-шерстно-молочные	Андийская		16,8	113,7	90	95
		Гиссарская		-	1,7	1,9	2
		Буубей		-	20,9	21,4	9,4
		Калмыцкая курдючная		-	5,8	53,5	45
		Карачаевская	17,9	40,8	234,7	261	210
		Катумская					1,8
		Лезгинская	28	54,2	138,9	95,4	100
		Монгольская			17,9	6,8	18
		Тушинская	2,8	1,1	113,3	62,7	57
	Смушко-вые	Каракульская		27,5	40,8	29,4	2
	Мясо-шерстные	Кучугуровская	3,3	0,1		0,2	0,7
		Тувинская коротко-жирно-хвостая	82,7	78,3	272,4	191	100
	Мясо-шубные	Романовская	18,1	16,2	59,0	57,7	39
	Мясо-сальные	Эдильбаевская		12,7	96,9	122	92

Анализ данных таблицы 2 показывает, что среди тонкорунных пород пока достаточной численностью поголовья могут похвастаться только грозненская, волгоградская и дагестанская горная породы, в относительно спокойной ситуации находятся породы: советский меринос, забайкальская и ставропольская. Остальные тонкорунные породы – в зоне риска.

Для полутонкорунных пород вывод о стабильности поголовья может быть сделан только по куйбышевской породе, все остальные – в зоне риска.

По полугрубошерстным породам, соответственно, о стабильной ситуации можно говорить по горноалтайской и цигайской породам.

Среди многочисленных отечественных грубошерстных пород стабильной можно считать ситуацию по следующим породам: андийская, карачаевская, лезгинская, тушинская, тувинская КЖХ, романовская и эдильбаевская.

Без мер государственной поддержки большинство из 51 пород овец в ближайшие 5-10 лет в Российской Федерации может исчезнуть безвозвратно.

Экономическим базисом негативной динамики поголовья является критически низкая рентабельность производства шерсти. По данным отраслевой отчетности за 2023-2024 годы, закупочные цены на немытую шерсть в РФ варьировались в диапазоне 15-100 руб./кг в зависимости от региона и качества, что зачастую не покрывает даже прямых затрат на стрижку (до 150-200 руб. на голову) [8]. В результате для многих сельхозтоваропроизводителей шерсть становится планово-убыточным продуктом, а бизнес-модель смещается в сторону мясного овцеводства, что ведет к утрате стратегического сырьевого потенциала для легкой промышленности.

При анализе ситуации в секторах подготовки шерсти к продаже следует обратить внимание на то, что подавляющий объем производимой в стране немытой шерсти до сих пор не проходит сертификацию, хотя 2 лаборатории (в ФНЦ «ВНИИПлем» и Ставропольском ГАУ) имеют соответствующее мировому уровню оборудование, обеспеченность кадрами. Отсутствует только непрерывность в заказе на сертификацию шерсти от отраслевых организаций.

По нашему мнению, это существенно снижает не только экономические результаты овцеводческих организаций, но и приводит к снижению обоснованности выбора надлежащей технологии для первичной обработки и переработки шерсти в готовые изделия: пряжу, ткани, трикотажные и иные изделия (в т.ч. и в смеси с другими видами волокон).

Отсутствие инструментального подтверждения качества (сертификации IWTO) не позволяет российской шерсти стать полноценным биржевым товаром. Это вынуждает производителей реализовывать сырье через цепочку посредников с дисконтом «на риск», что снижает выручку овцеводческих хозяйств на 20-30% от потенциально возможной рыночной цены [15].

В секторе первичной обработки шерсти (далее – ПОШ) превалирует использование классической технологической цепочки «немытая шерсть – мытая шерсть», которая не позволяет добиться максимума эффективности, особенно, при переработке сильно засоренной растительными примесями шерсти. А такой шерсти в РФ в последние годы становится все больше.

Наиболее эффективная технологическая цепочка, применяемая в мировой практике для камвольных видов шерсти (т.е. для шерсти не более 25 мкм тониной и со средней длиной штапелей немытой шерсти более 55 мм) с производственным циклом: «немытая шерсть – однопрочесная гребенная лента» (или топс, как его часто называют в Великобритании и других англоговорящих странах), к великому сожалению авторов в РФ реализуется исключительно на одном предприятии в Карачаево-Черкесской Республике.

Эффективность этой технологии доказана и экспериментально проверена во многих странах мира, включая и дружественные РФ страны: Китай, Бразилия, ЮАР и т.д. Эта технология подробно описана и в отечественной научной литературе [16]. Ее использование позволяет за счет того, что сразу после промывки шерсти волокнистый материал, являющийся не ориентированным в пространстве, не подвергают опасному для кератина шерсти жестокому процессу сушки и последующему сжатию, а продолжают технологическую цепочку (еще 5-7 переходов машин) и получают топс – т.е. однопрочесную гребенную ленту, где волокна шерсти практически полностью параллелизованы. Сжатие ленты, производимое на завершающем этапе технологической цепочки такой так называемой топсовой фабрики ПОШ, не приводит к высокой повреждаемости волокон шерсти, не ведет и к укорочению средней длины волокон в последующих полуфабрикатах производства. В совокупности, считается, что эта технология позволяет получить на 2-2,5% больше массы продукции, чем при использовании классической технологии фабрик ПОШ, работающих по циклу: немытая шерсть – мытая шерсть.

Переход на производство топса имеет фундаментальное экономическое значение. Топс является биржевым товаром, стоимость которого на мировом рынке в 2,5-3 раза выше стоимости мытой шерсти и в 8-10 раз выше стоимости немытого сырья. Текущая модель экспорта «грязной» или мытой шерсти с последующим импортом готовых изделий (тканей, трикотажа) приводит к потере до 300-400% добавленной стоимости, которая могла бы формироваться внутри экономики России при реализации кластерного подхода. Сделать продукцию отрасли биржевым товаром заинтересован и поддерживает

Минсельхоз России, в частности путем продвижения бренда «Шерсть России» [17].

Аналогичная ситуация с неполностью обоснованным выбором рациональной технологии происходит и в секторе переработки шерсти.

Как уже отмечалось выше, в Российской Федерации почти 95% производимой немытой шерсти не проходит процедуру сертификации. В то же время хорошо известны результаты масштабного международного проекта TEAM 1-2-3, проведенного более 35 лет назад научными организациями более чем в 15 странах мира и на производственных площадках почти 70 промышленных предприятий (фабрик ПОШ, камвольных и суконных комбинатов) [18, 19].

Были определены основные взаимосвязи между исходными качественными показателями немытой шерсти (микрон, содержание растительных примесей, процент разрывов штапелей немытой шерсти в середине штапеля, средняя длина и прочность штапелей шерсти) с итоговыми показателями средней обрывности в прядении (самый комплексный показатель) и рядом других (средняя длина волокон шерсти в топсе, средний процент очесов в 1-м гребнечесании).

Эти взаимосвязи экспериментальным путем, при использовании тех же международных методик и испытательного оборудования были проверены К.Э. Разумеевым в ходе нескольких проектов ЦНИИ Шерсти, проведенных на 9 крупных шерстеперерабатывающих предприятиях России, Белоруссии и других стран СНГ. Эти результаты прошли обсуждение, поддержаны научной общественностью и были опубликованы.

Основными рекомендациями можно пользоваться и сейчас, в частности, эти результаты активно используются на единственном предприятии, реализующим непрерывную технологию «немытая шерсть – однопрочесная гребенная лента (топс)», работающем в нашей стране. Но, в 99 случаев из 100, к сожалению, выбор технологии не определяется результатами сертификации шерсти, а также не определяется и расчетами по формулам проекта TEAM, уточнение которых было произведено для ряда предприятий [16].

В 2023-24 годы наметился государственный интерес к проблемам десятилетиями копившимся в секторах шерстяного комплекса нашей страны. Появился сначала проект, а затем и утвержденный Заместителем Председателя Правительства РФ Д.В. Мантуровым серьезный документ – «План мероприятий («дорожная карта») по развитию глубокой переработки овечьей шерсти на территории Российской Федерации» (далее – «План мероприятий…» [20].

В нем, в частности, предусматривается провести не только многочисленные организационные мероприятия, но и НИОКР, а также экспертизу готовящихся в ряде субъектов РФ проектов «шерстяных кластеров».

Наибольшую заинтересованность в реализации «Плана мероприятий…» проявили в следующих субъектах РФ:

- Республика Дагестан;
- Карачаево-Черкесская Республика;
- Республика Калмыкия;
- Республика Тыва;
- Забайкальский край;
- Ставропольский край.

В мае 2025 году «План мероприятий…» был дополнен и продлен период реализации многочисленных его разделов [21]. РГУ имени А.Н. Косыгина и РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева являются ответственными за выполнение ряда направлений и пунктов данного межотраслевого документа.

При последующих решениях о поддержке, либо отсутствии достаточного обоснования для неё, по нашему мнению, следует комплексно рассмотреть всю совокупность процессов, происходящих в шерстяном комплексе Российской Федерации, а также учесть изменения и тенденции мирового и отечественного рынков шерсти и всех видов продукции из нее, в т.ч. и в смеси с другими видами волокон.

Реализация данного документа должна рассматриваться не только как технологическая задача, но и как масштабный инвестиционный проект. Экономический потенциал реализации «дорожной карты» включает:

1. Снижение логистических издержек на 15-20% за счет создания промышленных кластеров полного цикла в местах производства сырья (Юг России, Северный Кавказ).

2. Импортозамещение готовой продукции. По данным ФТС, импорт шерстяных тканей и изделий ежегодно исчисляется сотнями миллионов долларов; локализация переработки позволит перенаправить эти финансовые потоки внутрь страны.

Авторы выражают готовность принять посильное участие в проведении отраслевой (межотраслевой) экспертизы указанных проектов, прежде всего, для того чтобы повысить эффективность использования в дальнейшем средств государственного (федерального и субъектов РФ) финансирования.

В то же время отмечаем, что формат имеющегося государственного документа «План мероприятий…», даже после его доработки и ряда дополнений в 2025 году, не позволяет учесть все накопившиеся в шерстяном комплексе РФ проблемы, частично уже нашедшие отражение в разработанной по заданию СОЮЗЛЕГПРОМ «Стратегии развития текстильной и швейной промышленности Российской Федерации до 2035 года» [22]. Указанный документ является весьма полезным, может служить некоей канвой или основой, но в нем не нашли надлежащего отражения уникальные вопросы производства и переработки шерсти, сырьевой раздел данной «Стратегии…», по нашему убеждению, плохо проработан.

Выводы. В результате проведенного авторами мониторинга секторов шерстяного комплекса РФ установлено:

1. Шерстяной комплекс России существенно разбалансирован, производство немытой шерсти существенно превышает мощности сохранившихся в стране камвольных, суконных, трикотажных производств.

2. Требуется государственное решение о безотлагательной разработке долгосрочной (на период 10-15 лет) «Стратегии развития шерстяного комплекса Российской Федерации», где комплексно можно было бы рассмотреть состояние и тенденции развития каждого из секторов от овцеводства до продажи готовых изделий из шерсти (в т.ч. и в смеси с другими волокнами).

3. Недостаточная подготовка кадров с высшим и средним специальным образованием для секторов комплекса (а именно: классировщиков, сортировщиков, шерстоведов, прядильщиков, ткачей, отделочников – всё в области различных вариантов технологий ПОШ и переработки шерсти).

4. Для трансформации шерстяного комплекса из дотационного сектора в драйвер экономики необходимо внедрить механизм биржевой торговли шерстью (на основе обязательной сертификации) и стимулировать инвестиции (CAPEX) именно в глубокую переработку (производство топса и пряжи). Только переход от сырьевой модели к модели индустрии полного цикла обеспечит экономическую устойчивость отечественного овцеводства в долгосрочной перспективе.

Литература

1. Проблемные направления ресурсного обеспечения устойчивого развития агроэкономических систем / Л. Ф. Ситдикова, Ф. Н. Мухаметгалиев, А. Р. Валиев [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 1(69). С. 155-161. – doi: 10.12737/2073-0462-2023-150-156.

2. Technical and Economic Assessment of Local Power Supply Systems for Agro-Industrial Production in the Digital Economy / V. T. Vodyannikov, E. V. Khudyakova, M. M. Nizamutdinov [et al.] // International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES 2021) : Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources, Kazan, 28-29 мая 2021 года. Vol. 37. – Kazan: EDP Sciences, 2021. – P. 00132. doi: 10.1051/bioconf/20213700132.

3. Advanced digital transformations for food security / E. F. Amirova, I. N. Safiullin, O. V. Bakhareva, A. I. Sakhbieva // International Scientific and Practical Conference «Sustainable Development of Traditional and Organic Agriculture in the Concept of Green Economy» (SDGE 2021): Sustainable Development of Traditional and Organic Agriculture in the Concept of Green Economy (SDGE 2021), Smolensk, 27 ноября 2021 года. Vol. 42. – Smolensk: EDP Sciences, 2022. – P. 04008. – doi: 10.1051/BIOCONF/20224204008.

4. Ресурсный потенциал сельскохозяйственных организаций как конкурентное преимущество эффективного развития сельского хозяйства / Т. А. Дозорова, Е. А. Тарасова, В. М. Севастьянова, М. Р. Богапова // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 4(76). С. 103-110. – doi: 10.12737/2073-0462-2024-103-110.

5. Состояние и направления улучшения использования трудовых ресурсов сельского хозяйства региона / Г. П. Захарова, И. Н. Сафиуллин, Э. Ф. Амирова [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 1(69). С. 112-118. – doi: 10.12737/2073-0462-2023-108-114.

6. Гаспарян С. В., Макарова О. В., Жидков С. А. Оценка экспортного потенциала поставок зерна АПК России на мировой рынок // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17. № 3(82). С. 222-228. – doi: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_222.

7. Минаков А. В., Сафиуллин И. Н., Амирова Э. Ф. Реализация экспортного потенциала агропромышленного комплекса России в условиях развития цифровой экономики // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 2(74). С. 140-147. – doi: 10.12737/2073-0462-2024-140-147.

8. Федеральная служба государственной статистики: офиц. сайт. – URL: https:// rosstat.gov.ru (дата обращения: 10.09.2025).

9. Market Information. Edition 19 2024 / International Wool Textile Organisation (IWTO). – Brussels: IWTO, 2024. – 128 p. – URL: https://iwto.org/resources/statistics/ (дата обращения: 12.09.2025).

10. Разумеев К.Э. Производство и методы продажи шерсти // Овцы, козы, шерстяное дело. 1999. №1. С. 8-16.

11. Трухачев В.И. Шерстоведение: учебник / В.И. Трухачев, В.А. Мороз / Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь: АГТУ, 2012. – 496 с.

12. Мороз В.А. Овцеводство и козоводство: Учебник. – Ставрополь: Изд-во СтГАУ «АГРУС», 2005. – 496 с.

13. Овцеводство и козоводство Российской Федерации в цифрах / Егоров М.В., Луконина О.Н., Чернов В.В. / Справочник под руководством академика РАСХН Х.А. Амерханова. Ставрополь. 2024. – С. 1-128.

14. Ежегодник по племенной работе в овцеводстве и козоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2024 год). – Московская область: пос. Лесные Поляны, Изд-во ФГБНУ ВНИИплем, 2025. – с. 311.

15. Российский рынок шерсти: итоги 2023 г., прогноз до 2027 г. [Электронный ресурс] // Маркетинговое исследование NeoAnalytics. – М., 2024. – URL: https://www.neoanalytics.ru/rossiiskii-rynok-shersti/ (дата обращения: 10.09.2025).

16. Разумеев К.Э. Проектирование шерстяной гребенной ленты и пряжи на основе инструментального определения свойств немытой шерсти: Монография. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2005. – 246 с.

17. Минсельхоз предлагает сделать шерсть в России биржевым товаром. https://www.interfax.ru/business/1059066 (дата обращения: 21.11.2025).

18. Report on Trials Evaluating Additional Measurements. 1981-1988. Australian Wool Corporation, Melbourne, December 1988. – pp. 1-76.

19. TEAM-3 Processing Trial – May 2003 Uplate by TEAM-3 Steering Committee – International Wool Textile Organisation, Buenos Aires Congress, May 2003. – pp. 1-14.

20. План мероприятий («дорожная карта») по развитию глубокой переработки овечьей шерсти на территории Российской Федерации. – Утв. Заместителем Председателя Правительства РФ Д. Мантуровым 27 января 2024 г. №МД-П9-2371.

21. План мероприятий («Дорожная карта») по развитию глубокой переработки овечьей шерсти на территории Российской Федерации на период 2025-2026 годов. – 06 мая 2025 года. №МД-П9-16312.

22. Стратегия развития текстильной и швейной промышленности Российской Федерации до 2035 года / В.В. Радаев (рук-ль проекта), С.В. Голованова, Н.В. Конрой, З.В. Котельникова; НИУ «Высшая школа экономики». – М.: Изд. Дом Высшей школы экономики, 2024. – 488 с. doi:10.17323/978-5-7598-2998-0.

Сведения об авторах:

Разумеев Константин Эдуардович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и художественного оформления текстильных изделий, e-mail: ker2210@yandex.ru

Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия.

Амерханов Харон Адиевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, профессор кафедры частной зоотехнии, e-mail: h.amerhanov@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Медведев Александр Викторович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОНИР, e-mail: 24091955@mail.ru

Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия.

Сичевой Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, ведущий специалист, e-mail: Dmitriy.sichevoy@gmail.com

Российский сельскохозяйственный центр, Москва, Россия.

CURRENT SITUATION AND DINAMICS OF DEVELOPMENT OF SECTORS OF RUSSIAN FEDERATION WOOL INDUSTRY

K. E. Razumeev, Kh. A. Amerkhanov, A.V. Medvedev, D. V. Sichevoy

Abstract. A comprehensive monitoring of the status and economic dynamics of the Russian wool complex sectors under the pressure of sanctions and structural market deformation revealed a critical disparity between the high genetic potential of domestic sheep farming and the country's disproportionately low share of global wool textile market, which exceeded USD 39 billion in 2024 with an annual growth rate of 3.2%. It was established that a disruption in the process chain at the primary processing stage leads to the export of low-value raw materials and a loss of up to 300-400% of the added value generated by foreign processors. The current profitability of wool production, with purchase prices of 15-100 rubles per kg, remains negative without government subsidies, posing a real threat of losing the gene pool of 51 sheep breeds. For the first time in Russian literature, a comparative expert assessment of the development of the industry sectors in Russia and leading countries is presented. It demonstrates the critical lag in the domestic certification and sales segment, which automatically discounts the export price of Russian wool by 20-30% due to quality risks. The economic efficiency of implementing a continuous "raw wool - single-carded sliver" technology without intermediate drying preserves the physical and mechanical properties of the fiber and increases the productivity of the final product by 2-2.5%. The necessity of applying the calculation formulas of international TEAM project for forecasting yarn yield is demonstrated. Strategic priorities for the development of the Russian wool complex include the creation of full-cycle industrial clusters in the Southern and North Caucasus Federal Districts and the launch of an exchange trading mechanism based on mandatory certification. The proposed approach will reduce logistics costs by 15-20% and facilitate large-scale import substitution of finished textile products, transforming the wool industry from a subsidized raw materials sector into a driver of high-value-added light industry.

Key words: sheep farming, wool breeds, wool production, primary processing, wool processing, wool industry, action plan (roadmap).

References

1. Sitdikova LF, Mukhametgaliev FN, Valiev AR. [Problematic areas of resource provision for sustainable development of agro-economic systems]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 1(69). 155-161 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2023-150-156.

2. Vodyannikov VT, Khudyakova EV, Nizamutdinov MM. Technical and economic assessment of local power supply systems for agro-industrial production in the digital economy. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources, Kazan, May 28-29, 2021. Vol.37. Kazan: EDP Sciences. 2021; 00132 p. doi: 10.1051/bioconf/20213700132.

3. Amirova EF, Safiullin IN, Bakhareva OV, Sakhbieva AI. Advanced digital transformations for food security. International Scientific and Practical Conference "Sustainable Development of Traditional and Organic Agriculture in the Concept of Green Economy" (SDGE 2021): Sustainable Development of Traditional and Organic Agriculture in the Concept of Green Economy (SDGE 2021), Smolensk, November 27, 2021. Vol.42. Smolensk: EDP Sciences. 2022; 04008 p. – doi: 10.1051/BIOCONF/20224204008.

4. Dozorova TA, Tarasova EA, Sevastyanova VM, Bogapova MR. [Resource potential of agricultural organizations as a competitive advantage for effective development of agriculture]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 4(76). 103-110 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2024-103-110.

5. Zakharova GP, Safiullin IN, Amirova EF. [Status and directions for improving the use of labor resources in regional agriculture]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 1(69). 112-118 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2023-108-114.

6. Gasparyan SV, Makarova OV, Zhidkov SA. [Assessment of the export potential of grain supplies from the Russian agro-industrial complex to the world market]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.17. 3(82). 222-228 p. – doi: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_222.

7. Minakov AV, Safiullin IN, Amirova EF. [Realization of the export potential of Russian agro-industrial complex in the context of digital economy development]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 2(74). 140-147 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2024-140-147.

8. Federal State Statistics Service. [Internet]. Official website. [cited 2025, September 10]. Available from: https://rosstat.gov.ru.

9. Market Information. Edition 19 2024. [Internet]. International Wool Textile Organization (IWTO). Brussels: IWTO. 2024; 128 p. [cited 2025, September 12]. Available from: https://iwto.org/resources/statistics/.

10. Razumeev KE. [Production and methods of selling wool]. Ovtsy, kozy, sherstyanoe delo. 1999; 1. 8-16 p.

11. Trukhachev VI, Moroz VA. Sherstovodenie: textbook. [Wool science: textbook]. Stavropol State Agrarian University. Stavropol: ASTU. 2012; 496 p.

12. Moroz VA. Ovtsevodstvo i kozovodstvo: uchebnik. [Sheep and goat breeding: textbook]. Stavropol: Publishing House of Stavropol State Agrarian University AGRUS. 2005; 496 p.

13. Egorov MV, Lukonina ON, Chernov VV. Ovtsevodstvo i kozovodstvo Rossiyskoy Federatsii v tsifrakh. Spravochnik pod rukovodstvom akademika RASKhN Kh.A. Amerkhanova. [Sheep and goat breeding in the Russian Federation in figures. Handbook under the supervision of Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences Kh.A. Amerkhanov]. Stavropol. 2024; 1-128 p.

14. Ezhegodnik po plemennoy rabote v ovtsevodstve i kozovodstve v khozyaystvakh Rossiyskoy Federatsii (2024 god). [Yearbook on breeding work in sheep and goat breeding on farms of the Russian Federation (2024)]. Moscow region: pos.Lesnye Polyany, Izd-vo FGBNU VNIIplem. 2025; 311 p.

15. Russian Wool Market: results of 2023, forecast to 2027. [Internet]. Marketing Research NeoAnalytics. Moscow. 2024; [cited 2025, September 10]. Available from: https://www.neoanalytics.ru/rossiiskii-rynok-shersti/.

16. Razumeev KE. Proektirovanie sherstyanoy grebennoy lenty i pryazhi na osnove instrumentalnogo opredeleniya svoystv nemytoy shersti: monografiya. [Design of combed wool sliver and yarn based on instrumental determination of raw wool properties: monograph]. Moscow: MGTU im. A.N. Kosygina, 2005; 246 p.

17. Ministry of Agriculture proposes making wool an exchange commodity in Russia. [Internet]. Interfax. [cited 2025, November 21]. Available from: https://www.interfax.ru/business/1059066.

18. Report on trials evaluating additional measurements. 1981-1988. Australian Wool Corporation. Melbourne. December 1988; 1-76 p.

19. TEAM-3 Processing Trial – May 2003 Uplate by TEAM-3 Steering Committee – International Wool Textile Organization. Buenos Aires Congress. May 2003. 1-14 p.

20. Plan meropriyatiy ("dorozhnaya karta") po razvitiyu glubokoy pererabotki ovechey shersti na territorii Rossiyskoy Federatsii. – Utv.Zamestitelem Predsedatelya Pravitelstva RF D.Manturovym 27 yanvarya 2024g. № MD-P9-2371. [Action plan ("road map") for development of deep processing of sheep wool in the Russian Federation. Approved by Deputy Chairman of the Government of the Russian Federation D.Manturov on 27 January 2024, No. MD-P9-2371].

21. Plan meropriyatiy ("Dorozhnaya karta") po razvitiyu glubokoy pererabotki ovechey shersti na territorii Rossiyskoy Federatsii na period 2025-2026 godov. 06 maya 2025 goda. № MD-P9-16312. [Action plan ("road map") for development of deep processing of sheep wool in the Russian Federation for the period 2025-2026]. May 6, 2025. No. MD-P9-16312.

22. Radaev VV. (project manager), Golovanova SV, Conroy NV, Kotelnikova ZV. Strategiya razvitiya tekstilnoy i shveynoy promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii do 2035 goda. [Strategy for the development of textile and clothing industry of the Russian Federation until 2035]. National Research University Higher School of Economics. Moscow: Izd. Dom Vysshey shkoly ekonomiki. 2024; 488 p. doi:10.17323/978-5-7598-2998-0.

Authors:

Razumeev Konstantin Eduardovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Projection and Art Formation of Textile Goods, e-mail: ker2210@yandex.ru

Russian State University named after A.N.Kosygin (Technology. Design. Art), Moscow, Russia.

Amerkhanov Kharon Adievich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor of Department of Private Zootechny, e-mail: h.amerhanov@yandex.ru

Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia.

Medvedev Aleksandr Viktorovich – Doctor of Engineering Sciences, leading researcher, Department of Organization of Scientific Research and Development, e-mail: 24091955@mail.ru

Russian State University named after A.N.Kosygin (Technology. Design. Art), Moscow, Russia.

Sichevoy Dmitriy Vladimirovich – Ph.D. of Technical Sciences, leading specialist, email: Dmitriy.sichevoy@gmail.com

Russian Agricultural Center, Moscow, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-139-148
УДК 332.05

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН: ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

М. Р. Сафиуллин, Р. Т. Бурганов, Л. А. Ельшин, Д. Р. Абдрахманова

Реферат. Отрасль сельского хозяйства является базовой в РФ и определяет ключевые основы для устойчивого развития национальной экономической системы. Между тем в последние годы агропромышленный комплекс России и ее регионов сталкивается с нарастающими угрозами, выраженными в трансформации международных цепей поставок в условиях санкционных ограничений. В этой связи, оценка текущего положения и перспектив развития отрасли в рамках интенсивно реализуемых программ импортозамещения в условиях происходящих системных преобразований, является крайне актуальным направлением современных исследований. В ходе проведенного исследования выявлены основные закономерности, сформировавшиеся в сельскохозяйственной отрасли Республики Татарстан на момент обострения санкционного противостояния образца 2022 года в контексте импортозависимости рассматриваемого сектора экономики. В соответствии с построенной моделью влияния доли импорта из недружественных стран на объемы отгруженных товаров в секторе сельского хозяйства Республики Татарстан, прирост критического импорта на 1 п.п. влечет за собой снижение рассматриваемого показателя 3471,8 млн. рублей. Руководствуясь полученными результатами, а также опираясь на статистические данные относительно текущих тенденций развития отрасли, установлено, что к 2030 году. объемы собственного производства продукции в сельскохозяйственном комплексе региона увеличатся до уровня 223,3 млрд рублей в рамках поступательного движения в сторону снижения поставок импорта из недружественных стран. Элементы научной новизны выражаются в авторском подходе к анализу эффективности реализации программ импортозамещения аграрного сектора экономики региона на основе построения прогностической модели развития отрасли с учетом оценки импортозависимости.

Ключевые слова: агропромышленный сектор, регион, Республика Татарстан, импортозависимость, импортозамещение, санкционные ограничения, сценарное прогнозирование.

Введение. Развитие индустрии сельского хозяйства и обеспечения продовольственной безопасности является важнейшей доктриной устойчивого развития национальной экономики России. Данный постулат определяется тем, что аграрный сектор выступая в роли стратегической отрасли, формирует базовые основы для экономического развития, роста уровня и качества жизни населения. Между тем, в условиях повышенной турбулентности на внешних рынках, связанных, в частности, с усиливающимися процессами конкурентной борьбы между отдельными странами и блоками, интенсификацией торговых войн, набирающими обороты санкционных атак, индустрия сельского хозяйства в РФ сталкивается с рядом угроз и одновременно с открывающимися окнами возможностей. Изменившиеся геополитическая и геоэкономическая повестки предопределяют новую институционально-конъюнктурную среду для развития сельскохозяйственного сектора экономики России. При этом вопросы, связанные с поиском ответов о перспективах агропромышленного комплекса в новых условиях хозяйствования, лежат в плоскости эмпирического анализа данных и моделирования на их основе зарождающихся закономерностей. Насколько внешние ограничения блокируют развитие сельского хозяйства в регионах России, каким образом они определяют возможности развития данного сектора, каковы особенности дальнейших перспектив в данной отрасли – решению данных вопросов и посвящена настоящая статья. Ключевой целью исследования является проведение дескриптивно-эмпирического анализа эффективности реализации в регионе мер по импортозамещению в агропромышленном секторе и разработка прогностических оценок его развития в условиях происходящих системных преобразований во внешнем контуре национальной экономики России. Поставленная цель предопределила решение следующих задач:

- провести анализ основных тенденций развития сельскохозяйственного сектора экономики в регионе;
- выявить особенности импортозависимости исследуемой отрасли на мезо уровне;
- определить степень эффективности реализации программ импортозамещения в региональной индустрии сельского хозяйства;
- оценить перспективы развития аграрного сектора в регионе с учетом сценарного прогнозирования усиления реализации мер импортозамещения на основе инструментария экономико-математического моделирования данных.

Необходимо отметить, что в пространстве научных работ направление исследования экономики импортозамещения на отраслевом уровне занимает одну из приоритетных позиций. В целом, все сформировавшиеся в теории подходы можно сгруппировать на три условные части. Первый подход рассматривает импортозамещение как механизм повышения уровня конкурентоспособности национальной экономики в масштабах мировой экономической системы [1, 2, 3]. Второй опирается на

позицию, в соответствии с которой импортозамещение рассматривается как механизм роста конкурентоспособности местных производителей в условиях внешней конкурентной среды [4, 5]. В рамках же третьего подхода, импортозамещение выступает в роли вынужденной меры государства в условиях внешнего санкционного давления [6, 7]. Данная концепция, в наибольшей степени получила свое развитие в трудах российских экономистов в рамках набирающих обороты в мировой экономике механизмов санкционного и тарифного давления.

В контексте же вопросов, связанных с исследованиями в сфере реализации программ импортозамещения в сельскохозяйственном секторе экономики, необходимо выделить работы Журавлевой О.В., Митрофановой О.Н., Варвус С.А. [8], Буланкиной Е.В. [9], Юнусовой П.С. [10] и др. Концептуальные взгляды ученых сосредотачиваются на позиции, в соответствии с которой в условиях внешних ограничений реализация политики импортозамещения в секторе сельского хозяйства формирует базовые основы для усиления конкурентных позиций местных производителей, наращивания экспорта сельскохозяйственной продукции, и, в конечном итоге, способствует переходу на интенсификацию экспортоориентированной модели развития аграрного сектора национальной и региональной экономических систем.

Региональные аспекты реализации программ импортозамещения в индустрии сельского хозяйства также достаточно интенсивно проработаны в пространстве научных исследований российских и зарубежных ученых. Так, к примеру, в работе Юнусовой П.С. [10] отмечается о том, что изучение направлений и механизмов импортозамещения на уровне мезо экономических систем является важнейшим приоритетом в фарватере выработки национальных программ развития сельского хозяйства. Принимая во внимание специфические условия регионов, особенности интеграции их аграрных секторов экономики в международные цепи поставок, крайне важной задачей становится учет и анализ этих аспектов. Данный подход, основанный на индукции, формирует более устойчивые и стратегически адаптивные программы импортозамещения и развития сельского хозяйства на национальном уровне экономики. Аналогичных взглядов придерживаются и другие ученые, занимающиеся вопросами изучения устойчивого развития аграрной отрасли региональной экономики. К ним необходимо отнести труды Голубева А.В. [11], Крыловой Л.В. [12], Нечаева В.И. [13], Гайнутдинова И.Г., Мухаметгалиева Ф.Н., Хисматуллина М.М. [14], Ельшина Л.А., Шарапова А.Р., Мингулова А.М. [15], Часовских, В. П. [16] и др.

Несмотря на достаточно высокий уровень проработки вопросов в сфере изучения особенностей развития сельскохозяйственных секторов экономики, в том числе и в условиях внешних ограничений, важно отметить, что превалирующая часть исследований в рассматриваемой сфере фокусируется на применении методов дескриптивного анализа данных в рамках реализации эвристических методов исследования. Несмотря на научную объективность данных методов исследования, все же представляется важной задачей развитие экономико-математического инструментария, обеспечивающего возможность конструировать и эмпирически выявлять взаимосвязи и на этой основе строить прогностические модели в рассматриваемом секторе экономики. Попытка решения данного исследовательского аспекта и предпринята в настоящей статье.

Условия, материалы и методы. В качестве объекта исследования выступает Республика Татарстан. Предметом исследования являются экономические отношения по поводу формирования механизмов стимулирования агропромышленного сектора экономики региона в условиях внешних ограничений и реализуемых программ импортозамещения.

Как и большинство макроэконометрических моделей, оценка эффективности импортозамещения в сельскохозяйственном секторе экономики региона опирается на методы регрессионного анализа временных рядов. Основными источниками данных являются региональная статистика товарных номенклатур внешнеэкономической деятельности (ТНВЭД), публикуемые Федеральной таможенной службой России. Базовая система учета основана на классическом уравнении, оценивающим взаимосвязь между уровнем поставок импорта по направлению ТНВЭД «Продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье (кроме текстильного)» и параметром «Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (по хозяйственным видам деятельности)» в агропромышленном секторе региона.

Особенности разрабатываемой макроэкономической модели позволяют рассматривать систему международных связей как инструмент долгосрочного прогнозирования, пригодный для оценки сценарных последствий в сфере возможных корректировок трансформации транснациональных логистических связей в условиях системных преобразований.

Модель получает данные о величине импортозависимости аграрного сектора экономики региона от поставок из недружественных стран и рассчитывает степень его влияния на

устойчивость индустрии сельского хозяйства на мезо уровне (оценивается параметр уравнения для доли импорта товарных групп, поступающих из недружественных стран и участвующих в создании производства продукции сельскохозяйственного назначения в регионе). Построение макроэкономических моделей реализуется в рамках следующей организационной схемы (рис. 1).

Реализация исследования в фарватере обозначенных выше итераций требует обработки широкой совокупности статистических данных на мезоуровне. Однако, в условиях происходящих институционально-конъюнктурных преобразований ряд из них, особенно раскрывающих особенности внешнеэкономической деятельности регионов, не публикуется в открытом доступе. В этой связи в исследовании реализуется оценка по данным Федеральной таможенной службы за 2021 год, характеризующимся умеренными санкционными рестрикциями со стороны стран западного блока и обладающим широкой статистической базой, публикуемой в официальных статистических сборниках. Данный подход формирует базис для идентификации стартовых позиций в сфере импортоуязвимости относительно усиленного санкционного давления образца 2022-2025 годы. Кроме того этот подход позволяет определить наиболее уязвимые внешнеэкономические потоки, поставляемые ранее в регионы из стран, квалифицируемые сегодня как недружественные и требующие на современном историческом этапе повышенного внимания со стороны органов государственной власти в рамках реализации программ импортозамещения.



Рис. 1 - Алгоритм эмпирической оценки эффективности реализации программ импортозамещения в агропромышленном секторе экономики региона
Источник: разработано авторами

Включение в модель фактора, оценивающего долю недружественных стран, участвующих в поставках ТНВЭД в сельскохозяйственный сектор экономики региона обусловлено необходимостью учета влияния данного параметра на перспективы развития аграрной отрасли. Логично предположить, что в условиях усиления механизмов импортозамещения по товарным номенклатурам сельскохозяйственного назначения, снижение поставок ТНВЭД$_{крит.доля}$ будет означать, в случае реализации эффективной политики импортозамещения, наращивание объемов производства аналогичных товаров отечественного происхождения, что предопределяет интенсификацию аграрной отрасли в целом,

занятой в производстве данной продукции.

В качестве статистической базы исследования (экзогенные и эндогенные факторы) определены временные ряды за период с 2017 по 2024 годы.

Результаты и обсуждение. Отрасль сельского хозяйства занимает базовую позицию в экономике России и определяет автономность ее функционирования и обеспечения продовольственной независимости. Между тем уровень импортозависимости данного сектора оставался весьма заметным вплоть до 2022 года, ознаменовавшегося резким обострением в сфере санкционного противостояния российской экономики со странами западного блока. Сектор импорта продовольственных товаров и сельскохозяйственного сырья занимал третье место в общем объеме поставляемого импорта в Российскую Федерацию, занимая около 12% в период с 2017 по 2021 годы (рис. 2).

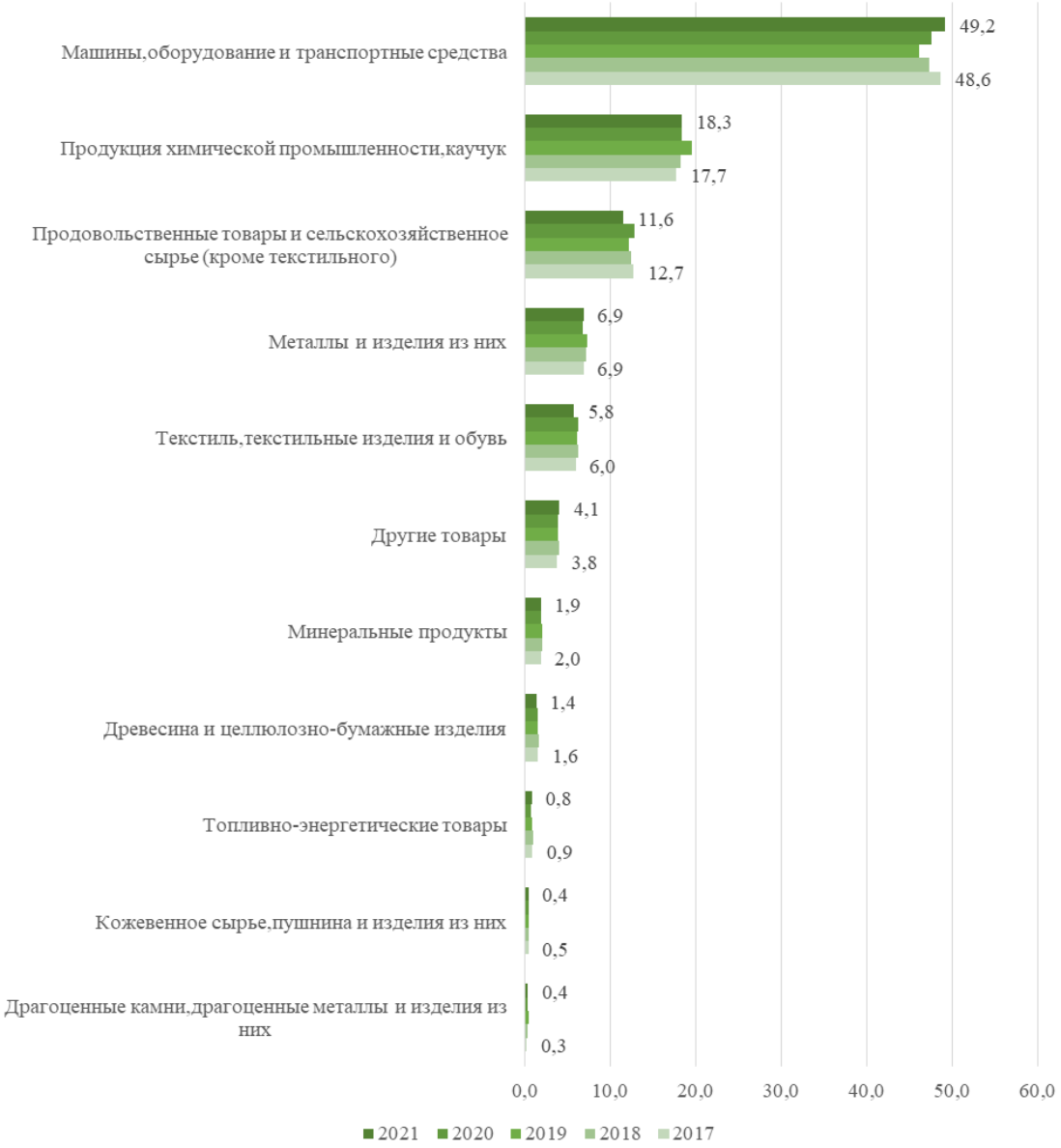


Рис. 2 - Структура импорта Российской Федерации (в % к итогу), 2017-2021 годы
Источник: Росстат [17]

Произошедшие в 2022 году изменения в институционально-конъюнктурной среде в рамках активно разворачивающихся внешних ограничений предопределили значительные изменения в развитии агропромышленного сектора в экономике России. Трансформация международных цепей поставок продукции сельскохозяйственного назначения сформировала новый виток структурных изменений в отрасли, что проявилось в наращивании процессов самообеспечения в сфере продовольствия в условиях интенсификации реализации программ импортозамещения. Стали расширяться агропромышленные предприятия, создаваться новые производства, формироваться новые, адаптивные к изменяющимся условиям подходы к ведению сельского хозяйства, произошла диверсификация

производственных процессов в рамках новой настройки межкооперационных цепей поставок внутри страны вне привлечения зарубежной продукции. Наиболее отчетливо данные тенденции проявляют себя в Республике Татарстан, демонстрирующей высокие показатели развития отрасли сельского хозяйства в санкционный период с 2022 по 2024 годы – периода новой конфигурации внешнеэкономической политики. За рассматриваемый промежуток времени объемы отгруженных товаров собственного производства в агропромышленной отрасли региона выросли на 50% относительно 2021 года (табл. 1).

Таблица 1 – Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами по сектору «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство», млн. рублей

Код	Название	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
A	Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	57 929,2	59 691,7	67 801,5	94 032,3	119 120,5	136 435,9	138 682,3	178 467,2
01	Растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг в этих областях	55 794,3	57 794,9	66 847,0	93 087,8	117 800,7	135 179,3	137 313,9	176 530,3
01.1	Выращивание однолетних культур	15 751,5	19 548,4	25 415,0	37 356,2	24 457,9	27 920,1	31 854,0	47 066,9
01.2	Выращивание многолетних культур	1 123,1	764,6	39,2	117,9	100,5	165,6	166,3	128,4
01.3	Выращивание рассады	306,2	226,1	315,9	254,3	104,2	*	25,6	29,3
01.4	Животноводство	35 210,9	33 058,5	37 876,9	43 697,0	70 171,0	68 376,3	74 386,1	85 876,7
01.5	Смешанное сельское хозяйство	1 816,6	2 278,1	1 095,8	7 900,7	17 233,2	25 196,2	21 951,7	33 347,1
01.6	Деятельность вспомогательная в области производства сельскохозяйственных культур и послеуборочной обработки сельхозпродукции	1 583,8	1 919,4	2 093,5	3 758,2	5 729,8	13 513,3	8 915,0	10 051,2

* данные отсутствуют

Источник: Татстат [18]

Наибольший уровень прироста отмечается в таких секторах, как:

- Выращивание однолетних культур;
- Животноводство;
- Смешанное сельское хозяйство;
- Деятельность вспомогательная в области производства сельскохозяйственных культур и послеуборочной обработки сельхозпродукции.

В то же время санкционное давление на российскую экономику крайне негативным образом отразилось на выращивании многолетних культур и выращивании рассады.

В целом, необходимо констатировать, что столь внушительные темпы роста отрасли сельского хозяйства в регионе во многом были предопределены реализацией комплексных программ федерального и регионального уровня в сфере импортозамещения. Тем самым можно констатировать об их высоком уровне эффективности.

Между тем, несмотря на очевидные позитивные сдвиги в формировании тенденций развития отрасли, требуется структурный анализ произошедших изменений с целью содержательного анализа разворачивающихся процессов и построения прогностических моделей. В рамках решения данной задачи, далее представлена попытка комплексного анализа импортозависимости сельскохозяйственного сектора экономики Республики Татарстан в период до 2022 года и разработка на основе выявленных закономерностей текущих и перспективных сценариев развития агропромышленной отрасли региона.

По данным Татстата, в секторе импорта по направлению ТНВЭД «Продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье (кроме текстильного)» в период с 2017 по 2021 годы отмечался заметный прирост в абсолютных значениях поставляемой продукции из стран дальнего зарубежья, относящихся в реалиях сегодняшнего дня к категории недружественных юрисдикций. За рассматриваемый период темпы прироста импорта продукции сельскохозяйственного и продовольственного назначения составили 44,5% (табл. 2).

Таблица 2 – Импорт продовольственных товаров и сельскохозяйственного сырья из стран дальнего зарубежья, тыс. долларов США

Код ТНВЭД ЕАЭС	Наименование товаров	2017		2018		2019		2020		2021	
		импорт, всего	импорт*	импорт, всего	импорт*	импорт, всего	импорт*	импорт, всего	им-порт*	импорт, всего	им-порт*
01-24	Продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье (кроме текстильного)	54541,32	30976,8	46388,67	30852,59	57055,1	31471,6	67373,8	36882,4	80683,6	44770,8

* импорт из стран дальнего зарубежья

Источник: Федеральная таможенная служба [17]

Особый уровень актуальности вопросов, связанных с импортозамещением в аграрном секторе экономики Республики Татарстан, проявляется на уровне поставок механизированных средств, участвующих в производственных процессах сельскохозяйственной отрасли. В таблице 3 представлен пример импортозависимости рассматриваемого сектора экономики региона от поставок машин или механизмов для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур, доля которых зависела от недружественных юрисдикций на более чем 90% от общего объема импортируемой продукции рассматриваемого типа.

Таблица 3 – Импорт сельскохозяйственной продукции по основным странам-партнерам Республики Татарстан, 2021 год (на примере кода ТНВЭД 8433)

Товарная группа	Стоимость импорта тыс.долл.США
Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур, включая пресс-подборщики, прессы для упаковки в кипы соломы или сена; сенокосилки или газонокосилки; машины для очистки, сортировки или калибровки яиц, плодов	82 463,70
Страны дальнего зарубежья	81 227,90
Австралия	0,1
Австрия	5,2
Аргентина	14,1
Белиз	0,4
Бельгия	30 897,50
Бразилия	8 579,50
Бурунди	0,3
Венгрия	0,5
Германия	1 517,20
Греция	0,6
Грузия	0,1
Дания	2,4
Израиль	0,5
Индия	33,8
Италия	1 483,90
Канада	3 812,90
Китай	64,5
Южная Корея	12,5
Латвия	0,6
Мексика	0,9
Нидерланды	417,3
Польша	23 797,40
Великобритания	8,5
США	10 431,20
Турция	39,5
Франция	54,3
Чехия	39,9
Швейцария	1,2
Швеция	11,1
Страны СНГ	1 235,80
Беларусь	1 002,10
Казахстан	45,8
Украина	187,8

Источник: Федеральная таможенная служба [17]

Принимая во внимание, что указанный в таблице перечень государств в текущих реалиях относится, преимущественно, к категории недружественных, локализация поставок продукции из них потенциально влечет за собой технологические риски обеспечения продовольственной безопасности. Однако в рамках кратко- и среднесрочных перспектив данные угрозы практически не проявляются.

В соответствии с построенной моделью влияния доли импорта из недружественных стран ($ТНВЭД_{крит.доля}$) на объемы отгруженных товаров собственного производства в секторе сельского хозяйства (СХ_производство) Республики Татарстан, прирост критического импорта на 1 п.п. влечет за собой снижение показателя СХ_производство на 3471,8 млн. рублей. Параметры модели, показатели ее статистической значимости, а также исходные данные для расчетов приведены в таблице 4, 5.

Таблица 4 – Исходные данные для конструирования модели влияния импорта продукции сельскохозяйственного назначения из стран дальнего зарубежья на развитие аграрного сектора экономики Республики Татарстан

Год	Доля импорта продукции сельскохозяйственного назначения из стран дальнего зарубежья в регион, в % от общего объема поставок импорта рассматриваемой ТНВЭД	Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (по хозяйственным видам деятельности), млн. рублей
2015	49,21	52156,1
2016	50,45	55456,4
2017	53,47	57 929,2
2018	51,68	59 691,7
2019	46,41	67 801,5
2020	39,22	94 032,3
2021	37,58	119 120,5

Источник: рассчитано по данным Федеральной таможенной службы [17]

Таблица 5 – Результаты моделирования

	Коэффициенты уравнения регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Y-пересечение	238295,9	32739,58	7,278528	0,005353
$ТНВЭД_{крит.доля}$	-3471,79	709,8362	-4,89097	0,016349

$R^2 = 0,89$

Источник: рассчитано авторами

Принимая во внимание, что объем отгруженных товаров собственного производства по виду деятельности «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» составил в 2024 году 178467,2 млн. руб. (табл. 1), продемонстрировав прирост около 50% относительно 2021 года, а также опираясь на полученные эконометрические оценки, характеризующие обратную зависимость между исследуемыми параметрами, доля импорта продукции сельскохозяйственного назначения в регион из стран дальнего зарубежья снизилась до 20,2% (в 2021году: 37,6% (табл. 4)). Данное сокращение эквивалентно, следуя расчетным оценкам и формируемым на их основе пропорциям, 64064,5 млн. рублям.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в Республике Татарстан в период с 2022 по 2024 годы, произошли значительные изменения в эффективности развития аграрного сектора экономики. Активная политика импортозамещения в исследуемой отрасли позволила на фоне ограничения поставок продукции сельскохозяйственного назначения из стран недружественного порядка, увеличить объемы собственного производства продукции в сельскохозяйственной отрасли региона на 64 млрд рублей.

В соответствии с полученными закономерностями, в таблице 6 представлены сценарные оценки развития отрасли в рамках дальнейших мероприятий, направленных на снижение импортозависимости региона и повышения эффективности работы предприятий из сферы сельскохозяйственного производства.

Таблица 6 – Сценарный анализ развития сельскохозяйственного сектора экономики Республики Татарстан в рамках поступательного движения в сторону снижения поставок импорта из недружественных стран

Показатели	Годы			
	2021	2024	2025	2030
$ТНВЭД_{крит.доля}$	37,58	20,2	16,6*	7,5*
Прирост объема отгруженной продукции по направлению «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» в рамках реализации программ импортозамещения, млрд. рублей		64	12,7	32,1
Прогноз значения валового объема отгруженной продукции по направлению «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство», млрд. рублей	119,1	178,5	191,2	223,3

* значения получены на основе предположения о дальнейшем снижении доли импорта из недружественных стран в рамках сформировавшихся в 2021-2024 тенденций

Источник: рассчитано по данным Федеральной таможенной службы [17]

Полученные оценки, раскрывающие особенности влияния реализации направлений в сфере импортозамещения в регионе, демонстрируют заметный прогностический рост аграрного сектора экономики Республики Татарстан на период до 2030 года. В соответствии с полученными результатами ожидаемый объем отгруженной продукции по направлению «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» оценивается на уровне 223,3 млрд рублей в рамках дальнейшего наращивания усилий в сфере импортозамещения. Важно подчеркнуть, что полученное прогнозное значение не учитывает иные механизмы интенсификации развития аграрного сектора экономики региона и концентрируется исключительно на оценке фактора, характеризующего снижение доли поставок продукции сельскохозяйственного и продовольственного назначения из стран дальнего зарубежья.

Выводы. Фиксируемый результат развития аграрного сектора экономики Республики Татарстан в анализируемый период времени с 2022 по 2024 годы, несомненно, является отражением эффективных мер, предпринятых в сфере импортозамещения и производства отечественных аналогов ранее поставляемой из-за рубежа продукции. Несмотря на то, что из регионального агропромышленного сектора региона выпала ощутимая часть поставщиков-импортеров, республика не только смогла адаптироваться к новой конфигурации внешнеэкономической деятельности в рамках замещения ушедшей с рынка зарубежной продукции отечественными аналогами, но и нарастить объемы собственного производства сельскохозяйственной продукции.

Во многом, несомненно, это результат реализации целого ряда государственных программ, среди которых необходимо выделить:

- федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2030 года;

- государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, введённая в целях реализации ФЗ «О развитии сельского хозяйства» и являющаяся результатом трансформации приоритетного национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности»;

- меры государственной поддержки Республики Татарстан, включая программы льготного кредитования сельскохозяйственных предприятий региона, различного рода субсидии, возмещение затрат и т.п.; и другие.

Между тем, несмотря на достигнутые высокие результаты к обеспечению автономности агропромышленного комплекса Республики Татарстан, отмечается достаточно сильная зависимость АПК региона от зарубежных комплектующих и техники, обслуживающих сельскохозяйственный сектор. К примеру, по группе ТНВЭД 8433 «Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур» более 90% продукции поставлялось на момент 2021 года из стран, относящихся сегодня в группе недружественных. Ограничение импорта из данных юрисдикций существенным образом было компенсировано за счет переориентации географии поставок и применения механизмов параллельного импорта. Вместе с тем, учитывая глубину проникновения недружественных стран в международные цепи поставок по данной группе товарной номенклатуры, полное замещение продукции в кратко- и среднесрочной перспективах представляется весьма затруднительной задачей. В этой связи, на фоне динамично развивающегося агропромышленного сектора в Республике Татарстан, продуцирующего, в свою очередь, рост износа техники и комплектующих, приоритетным направлением развития сельскохозяйственного сектора экономики региона является усиление внимания к импортозамещению в сфере машин, механизмов и технологий, применяемых в хозяйственной деятельности агропромышленного комплекса региона.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности по проекту № FZSM – 2023 – 0017 «Экономика импортозамещения региона в условиях трансформации логистических цепочек и деглобализации».

Литература

1. Toye J. Hans Singer’s Debts to Schumpeter and Keynes // Cambridge Journal of Economics. 2006. No 30. С.56-65

2. Новикова Т. С. Внешнеторговое взаимодействие России и Китая с учетом развития региональной научно-исследовательской инфраструктуры // Экономика региона. 2025. Т.21. №3. С. 686-702. doi: 10.17059/ekon.reg.2025-3-8.

3. Оценка перспектив экономического роста регионов России в условиях санкционных ограничений импорта / Сафиуллин М. Р., Бурганов Р. Т., Ельшин Л. А., Мингулов А. М. // Экономика региона. 2023. Т. 19. № 4. С. 1003-1017. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-4-5.

4. Часовских В. П. Об основных составляющих технологического суверенитета России в условиях современных вызовов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. № 6. С. 74-82.

5. Priyatosh Maitra. Import Substitution Potential in East Africa. East African Institute of Social 8. Research, Makerere University College, Kampala, Uganda by Oxford University Press Nairobi. Kenya. 1967. 51 P.

6. Абалкин Л. И. Избранные труды (в 4-х т.) Т. IV: В поисках новой стратегии. - М.: Экономика, 2000. 799 с.

7. Ullrich K. Russia – import substitution during recession. KfW Research Focus on Economics. 2017, №.173. pp. 1–3.

8. Журавлева О. В. Оценка реализации политики импортозамещения в сельском хозяйстве и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2024. № 3(67). С. 84-96. doi: 10.26456/2219-1453/2024.3.084-096.

9. Буланкина Е. В. Реализация государственной политики импортозамещения в сельском хозяйстве Самарской области: анализ конгрессно-выставочной деятельности региона // Бизнес. Образование. Право. 2019. № 1(46). С. 123-126. doi: 10.25683/VOLBI.2019.46.146.

10. Юнусова П. С. Конкурентоспособность продукции сельского хозяйства как условие обеспечения импортозамещения // Региональные проблемы преобразования экономики. 2021. № 5(127). С. 49-57. doi: 10.26726/1812-7096-2021-5-49-57.

11. Голубев А. В. Агропродовольственное импортозамещение через призму устойчивости сельского хозяйства // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2022. № 8. С. 2-8. doi: 10.31442/0235-2494-2022-0-8-2-8.

12. Крылова Л. В. Перспективы развития сельского хозяйства в условиях реализации государственной политики импортозамещения // Торговля и рынок. 2020. № 2(54). С. 106-112.

13. Нечаев В. И. Ускоренная реализация Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства как стратегическое направление импортозамещения в отрасли // Экономика сельского хозяйства России. 2023. № 5. С. 2-12. doi: 10.32651/235-2.

14. Роль и значение сельского хозяйства в обеспечении экономической и социальной стабильности общества (на примере Республики Татарстан) / Гайнутдинов И. Г., Мухаметгалиев Ф. Н., Хисматуллин М. М. [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т.19, № 3(75). С. 93-104. doi: 10.12737/2073-0462-2024-93-104.

15. Ельшин Л. А., Шарапов А. Р., Мингулов А. М. Стратегическая адаптация аграрных регионов к внешним конъюнктурным изменениям // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 1(77). С. 109-118. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-109-118.

16. Pezoldt K., Mikheeva E. A., Koval A. G., Gubina M. A. Protection of Geographical Indications in International Trade: Prospects for Russia // Economy of Regions. 2022. Vol.18, No. 3. P. 882-894. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-3-18.

17. Справочные и аналитические материалы. URL: https://customs.gov.ru/statistic (Дата обращения: 15.07.2025).

18. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Татарстан. URL: https://16.rosstat.gov.ru/?ysclid=mdsltxgink801869758 (Дата обращения: 15.07.2025).

Сведения об авторах:

Сафиуллин Марат Рашитович – доктор экономических наук, профессор, проректор по вопросам экономического и стратегического развития[1], вице-президент[2], e-mail: Marat.Safiullin@tatar.ru

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

[2] Академия наук Республики Татарстан, Казань, Россия.

Бурганов Рафис Тимерханович – доктор экономических наук, доцент, ректор, e-mail: info@sportacadem.ru

Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, Казань, Россия.

Ельшин Леонид Алексеевич – доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник Центра стратегических оценок и прогнозов, заведующий кафедрой мировой и региональной экономики[1], директор[2], e-mail: Leonid.Elshin@tatar.ru

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

[2]Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия.

Абдрахманова Диляра Расимовна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления в спорте, e-mail: diliararasimovna@gmail.com

Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, Казань, Россия.

EFFECTIVENESS OF IMPORT SUBSTITUTION PROGRAMS IN AGRICULTURE IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN: AN EMPIRICAL ANALYSIS

M. R. Safiullin, R. T. Burganov, L. A. Elshin, D. R. Abdrakhmanova

Abstract. Agriculture is the foundational sector of the Russian Federation and defines the key foundations for sustainable development of national economic system. Meanwhile, in recent years, agro-industrial complex of Russia and its regions has faced increasing threats, manifested in the transformation of international supply chains in the context of sanctions restrictions. Therefore, assessing the current situation and development prospects of the sector within the framework of intensively implemented import substitution programs in the context of ongoing systemic transformations is a highly relevant area of modern research. This study identified main patterns that emerged in the agricultural sector of the Republic of Tatarstan during the escalation of sanctions standoff in 2022 in the context of import dependence of considered economic sector. According to the constructed model of the impact of the share of imports from unfriendly countries on the volume of goods shipped in the agricultural sector of the Republic of Tatarstan, a 1 percentage point increase in critical imports entails a decrease of 3,471.8 million rubles in this indicator. Based on the obtained results, as well as statistical data on current industry development trends, it was determined that by 2030, the volume of domestic agricultural production in the region will increase to 223.3 billion rubles as part of a progressive movement toward reducing imports from unfriendly countries. Elements of scientific novelty are expressed in the author's approach to analyzing the effectiveness of import substitution programs in the regional agricultural sector based on the construction of a predictive model of industry development, taking into account an assessment of import dependence.

Key words: agro-industrial sector, region, Republic of Tatarstan, import dependence, import substitution, sanctions restrictions, scenario forecasting.

References

1. Toye J. Hans Singer's Debts to Schumpeter and Keynes. Cambridge Journal of Economics. 2006; No.30. 56-65 p.

2. Novikova TS. [Foreign trade interaction between Russia and China, taking into account the development of regional

research infrastructure]. Ekonomika regiona. 2025; Vol.21. 3. 686-702 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2025-3-8.

3. Safiullin MR, Burganov RT, Elshin LA, Mingulov AM. [Assessment of economic growth prospects of Russian regions in the context of import sanctions]. Ekonomika regiona. 2023; Vol.19. 4. 1003-1017 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-4-5.

4. Chasovskikh VP. [On the main components of Russia's technological sovereignty in the context of modern challenges]. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. 2024; 6. 74-82 p.

5. Priyatosh Maitra. Import substitution potential in East Africa. East African Institute of Social 8. Research, Makerere University College, Kampala, Uganda by Oxford University Press Nairobi. Kenya. 1967; 51 p.

6. Abalkin LI. Izbrannye trudy (v 4-kh t.) T. IV: V poiskakh novoy strategii. [Selected works (in 4 volumes) Vol. IV: in search of a new strategy]. Moscow: Ekonomika. 2000; 799 p.

7. Ullrich K. Russia – import substitution during recession. KfW Research Focus on Economics. 2017; 173. 1-3 p.

8. Zhuravleva OV. [Assessment of implementation of import substitution policy in agriculture and regulation of agricultural markets]. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie. 2024; 3(67). 84-96 p. doi: 10.26456/2219-1453/2024.3.084-096.

9. Bulankina EV. [Implementation of the state policy of import substitution in agriculture of Samara Region: analysis of the region's congress and exhibition activities]. Biznes. Obrazovanie. Pravo. 2019; 1(46). 123-126 p. doi: 10.25683/VOLBI.2019.46.146.

10. Yunusova PS. [Competitiveness of agricultural products as a condition for ensuring import substitution]. Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki. 2021; 5(127). 49-57 p. doi: 10.26726/1812-7096-2021-5-49-57.

11. Golubev AV. [Agri-food import substitution through the prism of agricultural sustainability]. Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy. 2022; 8. 2-8 p. doi: 10.31442/0235-2494-2022-0-8-2-8.

12. Krylova LV. [Prospects for the development of agriculture in the context of implementation of the state policy of import substitution]. Torgovlya i rynok. 2020; 2(54). 106-112 p.

13. Nechaev VI. [Accelerated implementation of federal scientific and technical program for agriculture development as a strategic direction of import substitution in the industry]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2023; 5. 2-12 p. doi: 10.32651/235-2.

14. Gaynutdinov IG, Mukhametgaliev FN, Khismatullin MM. [The role and importance of agriculture in ensuring the economic and social stability of society (on the example of the Republic of Tatarstan)]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 3(75). 93-104 p. doi: 10.12737/2073-0462-2024-93-104.

15. Elshin LA, Sharapov AR, Mingulov AM. [Strategic adaptation of agricultural regions to external market changes]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025; Vol.20. 1(77). 109-118 p. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-109-118.

16. Pezoldt K, Mikheeva EA, Koval AG, Gubina MA. Protection of geographical indications in international trade: prospects for Russia. Economy of Regions. 2022; Vol.18. No.3. 882-894 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-3-18.

17. Reference and analytical materials. [Internet]. Federal Customs Service. [cited 2025, July 15]. Available from: https://customs.gov.ru/statistic.

18. [Internet]. Territorial office of Federal State Statistics Service of the Republic of Tatarstan. [cited 2025, July 15]. Available from: https://16.rosstat.gov.ru/?ysclid=mdsltxgink801869758.

Authors:

Safiullin Marat Rashitovich – Doctor of Economics, Professor, Vice-Rector for Economic and Strategic Development[1], Vice-President[2], e-mail: Marat.Safiullin@tatar.ru
[1]Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
[2]Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia.
Burganov Rafis Timerkhanovich – Doctor of Economics, Associate Professor, Rector, e-mail: info@sportacadem.ru
Volga Region State University of Physical Education, Sports and Tourism, Kazan, Russia.
Elshin Leonid Alekseevich – Doctor of Economics, leading researcher of Center for Strategic Assessments and Forecasts, Head of Global and Regional Economics Department[1], Director[2], e-mail: Leonid.Elshin@tatar.ru
[1]Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
[2]Center for Advanced Economic Research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia.
Abdrakhmanova Dilyara Rasimovna – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Economics and Management in Sports Department, e-mail: diliararasimovna@gmail.com
Volga Region State University of Physical Education, Sports and Tourism, Kazan, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-149-160
УДК 338.43(470)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФРУКТАМИ И ЯГОДАМИ НАСЕЛЕНИЯ РЕГИОНОВ: КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД

А. Е. Суглобов, Е. А. Майорова, Н. В. Лясников, Е. Г. Абрамов, М. К. Джикия

Реферат. Российское население испытывает дефицит потребления фруктов на протяжении многих лет. Фрукты и ягоды отличаются наибольшим разрывом между фактическим (44,6%) и пороговым (60%) уровнем самообеспечения на 2023 год и наибольшим среди других продуктов недопотреблением в среднем по стране, порядка 66 кг/чел. при рациональной норме 100 кг/чел. Но средние оценки не показывают ситуацию в отдельных регионах, поэтому авторами была выполнена кластеризация регионов по показателям, характеризующим сферы производства, обращения и потребления фруктов и ягод. В результате были выявлены четыре кластера и два нетипичных региона. В первый кластер вошли 40 регионов (47%), это европейская часть страны, субъекты СФО и ДВО. Второй кластер составили 32 региона (около 38%). Эти регионы производят фруктов и ягод меньше 1/3 от объема их потребления. Во втором кластере еще и уровень потребления ниже, чем в целом по стране. Повысить уровень обеспеченности здесь можно за счет импорта. В третий кластер вошли 6 регионов в центральной и южной части РФ с уровнем самообеспечения более 100%, но недостаточным потреблением из-за их вывоза. Эти регионы могут стать основой обеспечения продовольственной безопасности страны. Четвертый кластер – это Москва, Санкт-Петербург, Московская, Ленинградская и Нижегородская область. Здесь при меньшем уровне самообеспечения высокий уровень потребления обеспечивается ввозом фруктов и ягод из других регионов и государств. Работа должна вестись в повышении качества логистики и сдерживании уровня цен. Два уникальных региона – это Кабардино-Балкарская Республика и Краснодарский край – единственные, где выполняются рациональные нормы потребления фруктов и ягод, они являются локомотивом обеспечения продовольственной безопасности страны в части фруктов и ягод.

Ключевые слова: обеспеченность фруктами и ягодами, региональные диспропорции, кластерный анализ, продовольственная безопасность.

Введение. Достижение продовольственной безопасности относится к приоритетным задачам каждого государства и необходимо для благополучия его населения. В РФ продовольственная безопасность признается одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности, фактором сохранения государственности и суверенитета страны, важнейшей составляющей её социально-экономической политики.

Проблема обеспечения продовольственной безопасности обострилась для РФ в связи с санкционным давлением. Благодаря мерам, принимаемым государством (поддержке агропромышленного комплекса посредством субсидий, льгот, кредитов, Национальному проекту «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности» и др.), стране удается достойно встретить внешние вызовы. Уже были достигнуты пороговые значения уровня самообеспечения по зерну, растительному маслу, сахару, мясу, рыбе [1]. Но, несмотря на положительные результаты, делать вывод о достижении продовольственной безопасности преждевременно [2, 3].

Одной из важных задач в контексте продовольственной безопасности остается обеспечение населения фруктами и ягодами [4]. Продовольственная независимость по ним пока не достигнута [5]. Среди основных продуктов питания (включая мясо, молоко, рыбу, картофель, овощи) фрукты и ягоды отличаются: во-первых, наибольшим разрывом между фактическим и пороговым уровнем самообеспечения (в 2023 годы его фактическое значение составило 44,6% при пороговом значении 60% в соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента от 21.01.2020 г. №20); во-вторых, характерно наибольшее недопотребление населением фруктов и ягод (в 2023 годы их потребление в среднем на душу населения равнялось 66 кг/чел. при рациональной норме 100 кг/чел.).

Рассматривать обеспечение российского населения фруктами и ягодами целесообразно с учетом региональных особенностей. Во-первых, это связано с разнообразием природно-климатических условий, определяющих возможности производства фруктов и ягод и самообеспечение ими регионов. Во-вторых, высокая относительно прочих продуктов региональная дифференциация характерна для потребления фруктов и ягод (а также овощей). В 2023 годы соответствующий коэффициент вариации по фруктам и ягодам составил 27,9% (для сравнения: по мясу, яйцам – 17%, молоку – 19%). В-третьих, несмотря на положительные тенденции увеличения уровня самообеспечения и среднедушевого потребления фруктов и ягод по стране в целом, региональная дифференциация по потреблению возрастает. Если в 2019 годы размах вариации по регионам составлял 105 кг/чел., коэффициент вариации – 26,7%, то в 2023 годы – 116 кг/чел. и 27,9% соответственно.

Цель исследования заключалась в выявлении приоритетных способов обеспечения населения регионов фруктами и ягодами, дифференцированных с учетом региональных особенностей.

В экономической науке используют два подхода в отношении продовольственной безопасности региона. Согласно первому

подходу региональную продовольственную безопасность рассматривать некорректно в связи с единством продовольственного рынка страны и отсутствием барьеров для межрегионального перемещения продовольствия, согласно второму – напротив, исследование продовольственной безопасности на уровне регионов необходимо в связи с их дифференциацией по природным, экономическим и прочим особенностям [6]. В контексте настоящей работы предполагается, что категорию «продовольственная безопасность» следует применять к государству, в то время как в отношении регионов правильнее говорить об их продовольственном обеспечении [7, 8].

На рисунке 1 показаны взаимосвязи между продовольственным обеспечением регионов в части фруктов и ягод и отдельными ориентирами достижения национальной продовольственной безопасности. Связи рассмотрены в рамках трех сфер – сферы производства, обращения (включая межрегиональную торговлю и импорт) и потребления. Такой подход широко применяется в отечественных и зарубежных региональных исследованиях продовольственного обеспечения и продовольственной безопасности [9, 10]. В частности, И.С. Иваненко в работе, посвященной Приволжскому федеральному округу, указала, что обеспечение продовольственной безопасности «подразумевает контроль всей цепочки формирования и движения продуктов питания в стране – сельхозпроизводство, производство продуктов питания, оптовая торговля, розничная торговля, потребление…» [5]. А.И. Бородин и др. для регионов предложили использовать индекс продовольственной обеспеченности (*Food Provision Index*), рассчитываемый на основе показателей сфер производства, распределения и потребления продовольственной продукции [11]. Е.В. Жилина и И.М. Ханова в исследовании продовольственной безопасности при кластеризации (типизации) регионов также использовали показатели, характеризующие производство, распределение и потребление [12].

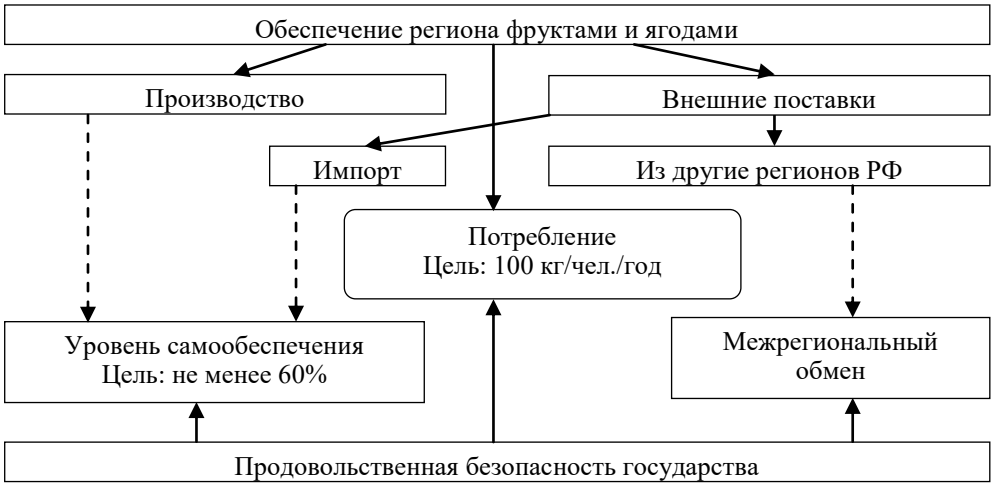


Рис. 1 – Взаимосвязь продовольственного обеспечения региона и продовольственной безопасности страны по фруктам и ягодам (2023 годы) (составлено авторами)

Уровень самообеспечения ягодами и фруктами заметно различается по регионам. Это обосновано концепцией сравнительных (конкурентных) преимуществ, в соответствии с которой каждый регион специализируется на той продукции, производству которой в большей мере способствуют его ресурсы [13]. Концентрация производства фруктов и ягод в регионах с наиболее подходящими природно-климатическими и другими условиями рациональна в контексте территориально-отраслевого разделения труда в рамках национальной аграрной политики.

Помимо собственного производства, регионы обеспечиваются фруктами и ягодами за счет импортных поставок. Например, импорт необходим в связи с высокой долей потребления экзотических фруктов и ягод, которая, согласно данным Общественного совета при Минсельхозе на 18.07.2023, составляет до 66%. В частности, группа «цитрусовых плодов» занимает второе место по удельному весу в ассортиментной структуре импортируемых продовольственных товаров [14]. Несмотря на то, что в РФ валовые сборы плодово-ягодных культур ежегодно возрастают, собственного производства все еще недостаточно ни для удовлетворения потребностей населения с учетом рациональных норм, ни для нормальной загрузки мощностей перерабатывающей промышленности [4]. В настоящее время страна остается одним из крупнейших импортеров фруктов и ягод [15]. Согласно мировой практике, высокая доля собственного производства способствует, но не гарантирует полного решения проблем с обеспеченностью определенными видами сельскохозяйственной продукции [16]. Поэтому, хотя достижение национальной продовольственной безопасности предполагает наличие импорта, однако его доля во внутреннем потреблении по стране должна снизиться.

Вторым способом обеспечения регионов фруктами и ягодами является их ввоз из других регионов РФ. Для отдельных регионов развитие межрегиональной торговли

подразумевает повышение их продовольственной зависимости, но это не противоречит национальным интересам в сфере продовольственной безопасности.

Наряду с развитием внутреннего агропромышленного производства важно гарантировать и межрегиональное распределение произведенной продукции, в том числе с активным использованием механизмов экономической поддержки, например, с развитием потребительской кооперации [17], как отмечают А.Е. Суглобов и А.Н. Адукова. Надежное обеспечение населения страны продовольствием зависит не только от его наличия, но и от того, насколько развит межрегиональный обмен [7]. Согласно Доктрине продовольственной безопасности, одним из направлений государственной политики является обеспечение физической доступности пищевой продукции путём «развития межрегиональной интеграции; поддержки регионов, находящихся в зонах недостаточного производства пищевой продукции…; развития транспортной и логистической инфраструктуры, в том числе в отдаленных регионах…». Межрегиональный обмен является одним из непременных атрибутов стабильного продовольственного снабжения населения и рассматривается как своего рода надстройка над самообеспечением, или как механизм компенсации его неравномерности по регионам [12].

Российское население испытывает дефицит потребления фруктов на протяжении многих лет [18]. Нормы потребления в 2023 году выполнялись только в двух регионах – Кабардино-Балкарской Республике (126 кг/чел./год) и в Краснодарском крае (102 кг/чел./год). Меньше всего фруктов и ягод потребляют в Чукотском автономной округе (10 кг/чел./год по итогам 2023 года). Н.В. Аликперова и А.В. Ярашева выделили заметную дифференциацию по потреблению фруктов и ягод в макрорегионах [19].

На потребление фруктов и ягод и его региональную дифференциацию влияют разные факторы – объемы производства, участие региона в транзите или переработке плодово-ягодной продукции [14, 18], доля городских и сельских жителей, традиции, культура потребления [20], доходы населения [21] и др. Задача обеспечения фруктами и ягодами населения актуальна для абсолютного большинства регионов. В контексте национальной продовольственной безопасности важным является сглаживание региональной дифференциации при увеличении среднедушевого потребления по стране.

Условия, материалы и методы. Для того, чтобы обозначить возможности обеспечения фруктами и ягодами регионов РФ с учетом региональных особенностей производства, обращения и потребления, была проведена их кластеризация. Формирование кластеров позволяет представить регионы в виде однородных групп, для каждой из которых далее определяются наиболее подходящие направления продовольственного обеспечения в части фруктов и ягод.

Показатели выбирались в рамках сфер производства, обращения и потребления в соответствии с задачей обеспечения продовольственной безопасности страны. Производство охарактеризовано уровнем самообеспечения региона фруктами и ягодами, распределение – развитием межрегиональной торговли, а именно объемами вывоза и ввоза фруктов и ягод из других субъектов РФ. Ввоз отражает зависимость конкретного региона от других российских регионов, но не от импорта, что соответствует задачам продовольственной безопасности государства. Вывоз характеризует значение региона для обеспечения фруктами и ягодами всего населения страны и её национальной продовольственной безопасности. Еще один показатель – объем потребления фруктов и ягод в среднем на душу населения, он также дифференцирован по регионам и позволяет сравнить фактическое потребление фруктов и ягод населением с рациональными нормами здорового питания.

Метод кластерного анализа предназначен для выявления скоплений объектов (кластеров) в многомерном признаковом пространстве и применяется в различных научных областях, включая региональные социально-экономические исследования [22]. Он является одним из функциональных средств для создания эффективной стратегии регионального развития и формирует основу для разработки дифференцированных и адресных мер поддержки регионов государством [23]. В частности, методы кластерного анализа применялись для группировки регионов РФ по базовым аграрно-экономическим критериям [24], уровню потенциала сельского хозяйства [25], уровню эффективности сельского хозяйства [26] и др.

Кластерный анализ используется для понимания данных путем выявления их структуры или, напротив, для обнаружения нетипичных объектов [27]. Среди множества методов кластерного анализа в исследованиях чаще всего применяется метод k-средних [22, 23]. Он является итеративным и основан на минимизации суммы квадратов отклонений точек кластеров от кластерных центров. Особенностью метода является необходимость предварительного выбора количества кластеров.

Кластеризация регионов проводилась по четырем показателям, которые доступны на сайте Росстата:

x1 – уровень самообеспечения фруктами и ягодами, %;

x2 – вывоз фруктов (включая цитрусовые и виноград) сельскохозяйственными организациями за пределы региона, тонн;

x3 – ввоз фруктов (включая цитрусовые и виноград) сельскохозяйственными организациями из других регионов, тонн;

x4 – потребление фруктов и ягод на душу населения в год, кг.

Ввоз и вывоз ограничен внутренней межрегиональной торговлей. Использовались данные

за 2023 г. по 85 субъектам РФ. Для исключения влияния разных единиц измерения и масштабов исходных данных они были стандартизированы – выполнено Z-преобразование, предполагающее вычитание из каждого наблюдения среднего значения и последующее деление результата на стандартное отклонение. Приведение показателей к единому безразмерному формату необходимо для корректной кластеризации.

Кластеризация проводилась методом k-средних (k-means) с использованием программы GeoDa. Помимо стандартизации данных, в параметрах был предусмотрен метод инициализации k-means++, который позволяет расположить начальные центроиды наиболее далеко друг от друга. Количество инициализаций – 150. Максимальное число итераций алгоритма после первоначального выбора центроидов – 1000. Количество регионов в одном кластере не ограничивалось.

Для выбора оптимального количества кластеров применялся метод «локтя». Он предполагает графическое преставление зависимости целевого показателя от количества кластеров. Целевым показателем явилось рассчитываемое GeoDa соотношение суммы квадратов межкластерных расстояний (BCSS – between-cluster sum of squares) и общей суммы квадратов отклонений от среднего (TSS – total sum of squares). Чем выше указанное соотношение и, соответственно, меньше сумма квадратов внутрикластерных расстояний (WCSS – within-cluster sum of squares), тем больше различия между кластерами и меньше – внутри них. Оптимальной считается точка перегиба, то есть та, после которой линия графика значительно меняет наклон и увеличение количества кластеров снижает свое влияние на целевой показатель.

Результаты и обсуждение. Попарные коэффициенты корреляции и поля рассеяния (рис. 2) свидетельствуют об отсутствии тесной связи между показателями, что позволяет проводить кластеризацию на их основе.

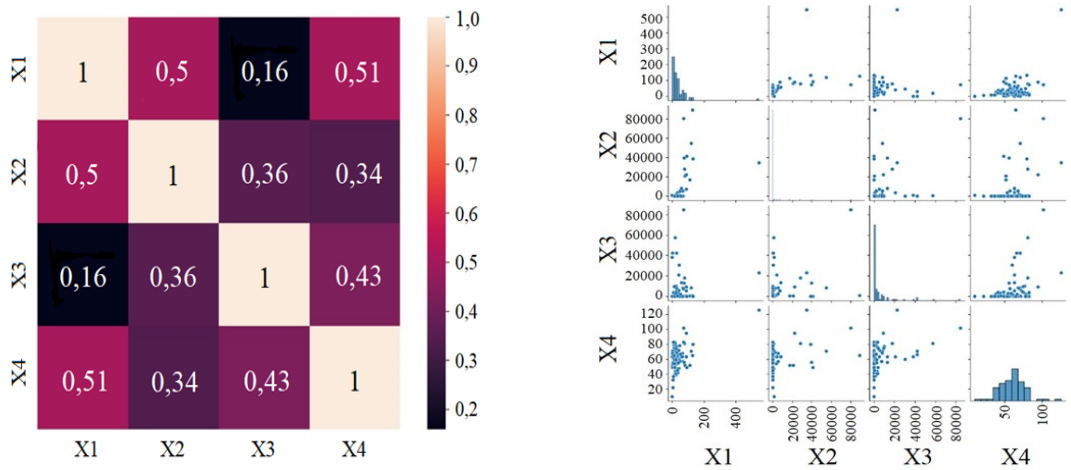


Рис. 2 – Коэффициенты корреляции Пирсона и диаграммы рассеяния между рассматриваемыми показателями

Источник: построено авторами с использованием данных Росстата

На основе метода «локтя» (рис. 3) решено разделить регионы на шесть кластеров. При шести кластерах соотношение BCSS/TSS составляет 0,83, то есть BCSS объясняет 83% разброса данных, WCSS – 17%, что приемлемо для кластеризации с позиции качества. Дальнейшее увеличение количества кластеров нецелесообразно, так как в меньшей мере влияет на соотношение BCSS/TSS.

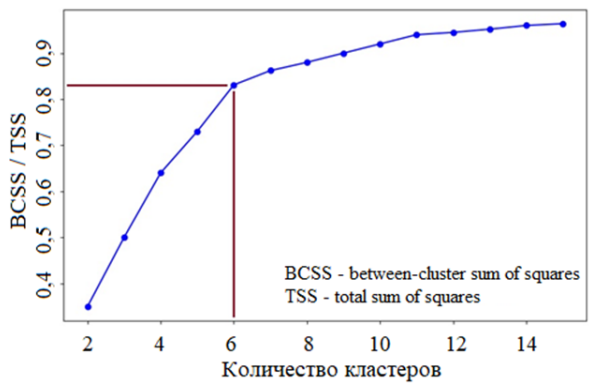


Рис. 3 – Иллюстрация метода локтя для выбора оптимального количества кластеров

Источник: построено авторами с использованием данных Росстата

В таблице 1 и на рисунке 4 представлены регионы РФ, вошедшие в каждый из кластеров, а также уникальные (нетипичные) регионы.

Первый кластер оказался наиболее многочисленным, в него вошли 40 регионов (47%). Большинство из них расположены в европейской части страны, среди прочих – субъекты Сибирского федерального округа, Красноярский край и Республика Хакасия, а также ряд дальневосточных. Здесь самообеспечение фруктами и ягодами почти в два раза ниже порогового значения. При небольшом ввозе среднее потребление по первому кластеру составило 67,5 кг/чел./год. Это меньше, чем рекомендовано для здорового питания, однако чуть больше, чем в среднем по стране.

Второй кластер составили 32 региона (около 38%). В его состав вошли субъекты всех федеральных округов РФ. При низком среднем уровне самообеспечения и наименьшем среди всех кластеров объеме ввоза второй кластер также отличается наименьшим потреблением фруктов и ягод населением.

В третий кластер вошли 6 регионов в центральной и южной части РФ, они имеют благоприятные природно-климатические условия. В среднем в регионах этого кластера уровень самообеспечения фруктами и ягодами не только соответствует требованиям продовольственной безопасности, но и превышает 100%. Еще одной важной характеристикой являются большие объемы вывоза в другие российские регионы. Среднее потребление фруктов и ягод на душу населения в третьем кластере превышает среднероссийское значение, однако тоже не соответствует рекомендуемым для здорового питания нормам.

Четвертый кластер характеризуется высоким ввозом фруктов и ягод из других российских регионов и импортом. Благодаря этому при наименьшем уровне самообеспечения потребление здесь выше среднего по РФ. В кластер вошли столичные регионы – Москва, Московская область, Санкт-Петербург, Ленинградская область, а также Нижегородская область. В Москву в 2023 году ввозились фрукты и ягоды из двадцати регионов РФ, больше всего – из Республики Адыгея. В Санкт-Петербург более половины фруктов и ягод поступили из Кабардино-Балкарской Республики. По ввозу в Московскую и Ленинградскую области лидирует Краснодарский край, в Нижегородскую область – Республика Крым. Как и в первых трех кластерах, рекомендуемые нормы потребления фруктов и ягод в среднем по четвёртому кластеру не достигнуты.

Кроме того, в результате кластеризации были выделены два уникальных региона, условно отнесенных к отдельным кластерам.

Первый из них – Кабардино-Балкарская Республика (условно пятый кластер), где уровень самообеспечения фруктами и ягодами составил 547%, то есть объемы производства в 5,5 раза превосходят внутреннее потребление и в 9,1 раза – пороговое значение, установленное Доктриной продовольственной безопасности РФ. Другой особенностью республики является потребление фруктов и ягод населением, которое превышает рекомендуемые рациональные нормы и является наибольшим среди всех российских регионов.

Второй уникальный регион (условно шестой кластер) – это Краснодарский край. Здесь уровень самообеспечения выше порогового значения, но его недостаточно для удовлетворения внутренних потребностей, хотя рекомендуемые для здорового питания нормы потребления фруктов и ягод выполняются. Регион является активным участником межрегиональной торговли.

Таблица 1 - Кластеры регионов РФ по показателям продовольственной безопасности по фруктам и ягодам

Номер кластера	Количество субъектов	Субъекты РФ
1	2	3
Кластеры		
1	40	Амурская область, Архангельская область, Астраханская область, Белгородская область, Чеченская республика, Челябинская область, Чувашская республика, Республика Дагестан, Ивановская область, Калининградская область, Калужская область, Камчатский край, Хабаровский край, Республика Хакасия, Кировская область, Костромская область, Красноярский край, Курганская область, Мурманская область, Ненецкий автономный округ, Новгородская область, Орловская область, Пермский край, Приморский край, Псковская область, Ростовская область, Сахалинская область, Самарская область, Саратовская область, Смоленская область, Ставропольский край, Свердловская область, Тамбовская область, Республика Татарстан, Тульская область, Тверская область, Удмуртская республика, Волгоградская область, Вологодская область, город Севастополь
2	32	Алтайский край, Республика Башкортостан, Брянская область, Республика Бурятия, Чукотский автономный округ, Республика Алтай, Иркутская область, Республика Калмыкия, Карачаево-Черкесская республика, Республика Карелия, Кемеровская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Республика Коми, Курская область, Магаданская область, Республика Марий Эл, Республика Мордовия, Новосибирская область, Омская область, Оренбургская область, Пензенская область, Рязанская область, Республика Саха (Якутия), Томская область, Республика Тыва, Тюменская область, Ульяновская область, Владимирская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, Ярославская область, Еврейская автономная область, Забайкальский край

Продолжение таблицы 1

1	2	3
3	6	Республика Адыгея, Республика Ингушетия, Липецкая область, Республика Северная Осетия – Алания, Воронежская область, Республика Крым
4	5	Город Москва, Московская область, город Санкт-Петербург, Ленинградская область, Нижегородская область
Уникальные регионы		
5	1	Кабардино-Балкарская Республика
6	1	Краснодарский край

Источник: составлено авторами с использованием данных Росстата



Рис. 4 – Кластеры регионов РФ по показателям продовольственной безопасности по фруктам и ягодам

Источник: построено авторами с использованием данных Росстата

Если сравнивать средние показатели кластеров (табл. 2), то полностью обеспечивает свои внутренние потребности во фруктах и ягодах третий кластер, а также Кабардино-Балкарская Республика. Кроме нее, среди отдельных регионов более чем на 100% самообеспечиваются фруктами и ягодами Липецкая область, Республика Крым, Республика Северная Осетия – Алания, вошедшие в третий кластер, и Карачаево-Черкесская Республика, попавшая во второй кластер. По объему вывоза в прочие регионы выделяется Краснодарский Край (уникальный регион), а непосредственно среди кластеров – третий. Причем Кабардино-Балкарская Республика уступает Краснодарскому краю более чем в 2 раза. По ввозу тоже лидирует Краснодарский край – активный участник российской межрегиональной торговли. В среднем большие объемы фруктов и ягод ввозят регионы четвертого кластера, минимальные – регионы второго кластера. По потреблению фруктов и ягод лидируют уникальные регионы – Кабардино-Балкарская Республика и Краснодарский край.

Таблица 2 – Средние значения показателей по кластерам

Кластер/ регион	Уровень самообеспечения, % (x1)	Вывоз, тонн (x2)	Ввоз, тонн (x3)	Потребление, кг/ чел/год (x4)
Кластеры				
1	31,1	1023,4	3289,9	67,5
2	23,9	1358,8	685,8	44,8
3	106,0	45785,5	6105,0	73,5
4	18,5	344,8	42096,0	68,2
Уникальные регионы				
5	547	34705	22852	126
6	72,4	80353	84390	102

Источник: составлено авторами с использованием данных Росстата

Уровень самообеспечения фруктами и ягодами регионов третьего кластера, Кабардино-Балкарской Республики и Краснодарского края превышает среднероссийский и установленный в качестве целевого. По первому, второму и четвертому кластерам средний уровень самообеспечения, напротив, ниже (рис. 5).

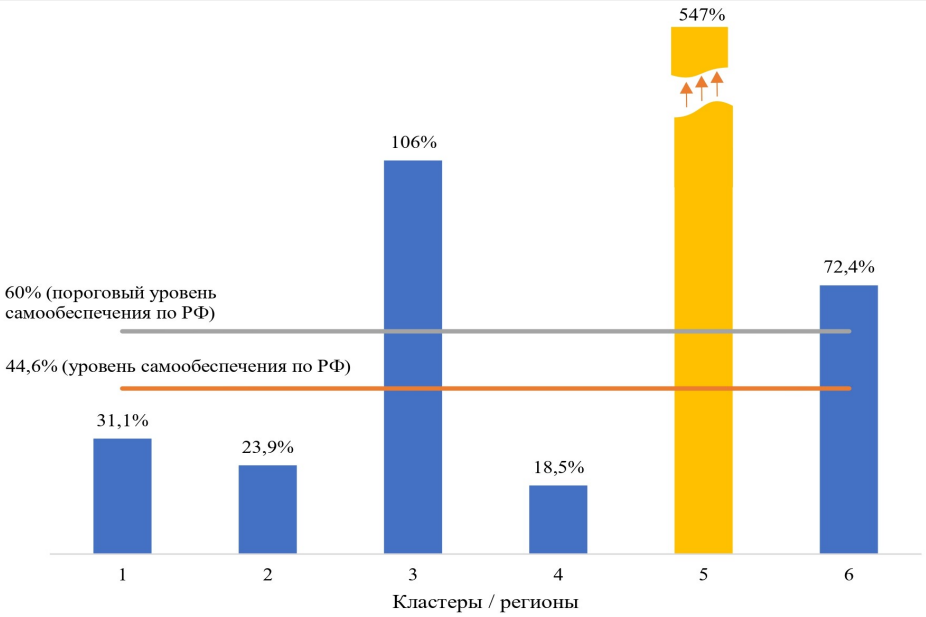


Рис. 5 – Средний уровень самообеспечения регионов фруктами и ягодами по кластерам в 2023 году

Источник: составлено авторами с использованием данных Росстата

Потребление фруктов и ягод населением соответствует рекомендуемым Минздравом рациональным нормам только в двух регионах России – Кабардино-Балкарской Республике и Краснодарском крае. Меньше всего фруктов и ягод потребляют в регионах второго кластера (рис. 6).

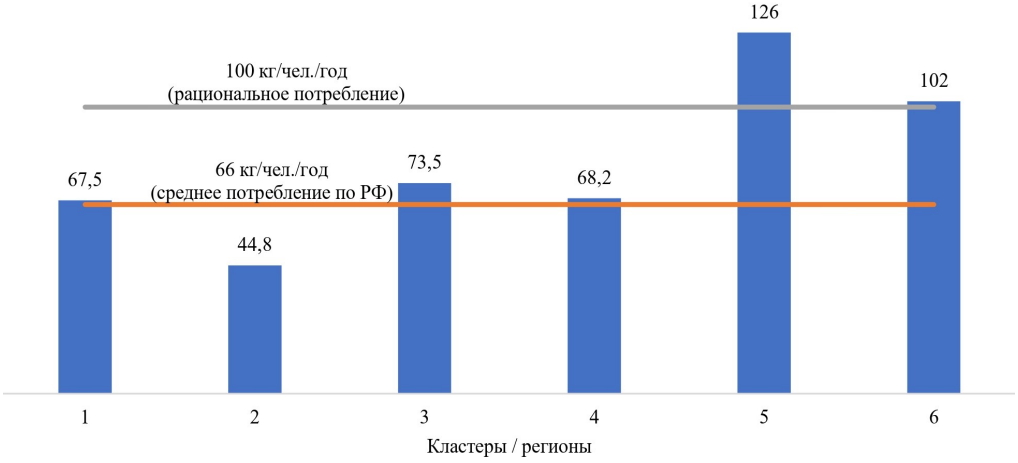


Рис. 6 – Среднее потребление фруктов и ягод населением регионов по кластерам в 2023 году, кг/чел./год

Источник: составлено авторами с использованием данных Росстата

Региональная кластеризация позволила определить направления работы для обеспечения населения регионов с учетом особенностей каждого кластера.

Регионы первого кластера производят фруктов и ягод меньше 1/3 от объема их потребления. Их уровень самообеспечения ниже предусмотренного Доктриной продовольственной безопасности. Ввоз фруктов и ягод из других российских регионов также относительно небольшой. Однако среднедушевой объем их потребления населением, хотя и не достигает рекомендуемых норм, немного больше, чем по РФ в целом. Например, в Красноярском крае среднее потребление фруктов и ягод в 2023 году составило 76 кг на человека в год, что на 10 кг больше, чем в среднем по РФ. Повысить уровень обеспеченности здесь можно за счет импорта. Если потребление ягод во многом связано с организационными решениями в отношении подходящих для северных условий брусники, клюквы, облепихи и др., то фрукты в Красноярский край импортируются – в основном из Китая, а также Узбекистана и других стран. По мере развития отечественного производства возможна частичная замена импорта фруктов и ягод на их ввоз из других регионов РФ. Однако отказ от импорта пока нерационален и невозможен. Сохранение импорта из

дружественных стран целесообразно в той мере, которая будет согласовываться с достижением порогового значения уровня самообеспечения РФ.

Второй кластер является наиболее проблемным. Здесь потребление фруктов и ягод меньше, чем в любом другом кластере, эти регионы не обеспечивают себя самостоятельно и мало ввозят из других регионов. Обеспечить население этих регионов поможет более активный импорт из дружественных России азиатских стран, что особенно актуально для дальневосточных и сибирских регионов с учетом логистических расходов. Импорт, не допускающий потерю национальной продовольственной независимости, оправдан и является одним из направлений формирования стратегии продовольственного обеспечения российского населения плодово-ягодной продукцией [4]. Во второй кластер также вошли два не совсем типичных для него региона – Карачаево-Черкесская Республика и Курская область. Уровень самообеспечения фруктами и ягодами Карачаево-Черкесской Республики превышает 100%, Курской области – составляет 79,3%, что выше среднероссийского и порогового значений. Однако потребление фруктов и ягод населением в этих регионах относительно низкое – в среднем по 52 кг на человека в год. В отношении Карачаево-Черкесской Республики вопрос о потреблении ставится уже давно: «… не совсем понятно, почему в регионах с относительно благоприятными природно-климатическими условиями при производстве плодово-ягодной продукции объем их потребления незначителен даже по среднероссийским меркам» [14]. Отчасти такая ситуация связана с вывозом фруктов и ягод из регионов. По данным Росстата, в 2023 году из Карачаево-Черкесской Республики в другие российские регионы вывезено более 17 тыс. тонн фруктов и ягод (в основном в Москву и Ставропольский край), из Курской области – более 20 тыс. тонн (в основном в Московскую область).

Третий кластер – это регионы с высоким уровнем самообеспечения фруктами и ягодами и с большими объемами вывоза в другие регионы РФ. В Воронежской области, Республике Адыгея и Республике Ингушетия уровень самообеспечения ниже 100%, но превышает пороговое значение продовольственной безопасности. Липецкая область, Республика Крым и Республика Северная Осетия – Алания производят фруктов и ягод больше, чем их внутренние потребление. Республика Крым лидирует среди всех российских регионов по объему вывоза фруктов и ягод, что подтверждает её состоявшуюся интеграцию в российскую экономику и большой вклад в обеспечение продовольствием всего российского населения. Регионы третьего кластера, наряду с Кабардино-Балкарской Республикой и Краснодарским краем имеют благоприятные условия для производства, они должны стать движущей силой повышения продовольственной независимости государства в отношении фруктов и ягод и создавать основу для их дальнейшего распределения по регионам.

В регионах четвертого кластера, несмотря на невозможность самообеспечения фруктами и ягодами, их потребление превышает среднероссийские значения. Население обеспечивается фруктами и ягодами как за счет активного ввоза из других российских регионов, так и за счет импорта. Достаточно благоприятная ситуация с потреблением сформирована благодаря развитой логистической инфраструктуре, а также эффективной розничной торговле и высоким доходам населения. Дальнейшая работа может быть направлена на повышение и сохранение качества ввозимой продукции, в частности, при сборке и доставке онлайн-заказов, на сдерживание роста потребительских цен, расширение доступного ассортимента за счет новых для жителей РФ экзотических фруктов.

Условно выделенные в качестве самостоятельных кластеров Кабардино-Балкарская Республика и Краснодарский Край являются уникальными. Это единственные российские регионы, в которых выполняются рациональные нормы потребления фруктов и ягод. Кабардино-Балкарская Республика производит фруктов и ягод почти в 5,5 раз больше, чем её внутренние потребности. Краснодарский край при уровне самообеспечения 72,4% является активным участником межрегионального распределения, участвуя и в вывозе, и во ввозе. Эти регионы являются локомотивом обеспечения продовольственной безопасности страны в части фруктов и ягод.

При интерпретации результатов по всем кластерам необходимо учитывать ряд положений и ограничений.

Во-первых, Е.В. Жилина и И.М. Ханова справедливо отметили, что не все российские регионы в полной мере используют имеющийся потенциал, например, Астраханская и Смоленская области [11]. В частности, Астраханская область имеет среднедушевой объем потребления фруктов и ягод выше среднероссийского, но низкий уровень самообеспечения (26,2%) при нулевом ввозе из других регионов РФ. С учетом природно-климатических условий регион обладает резервом для поиска новых точек роста, которые позволят обеспечить российское население продовольствием, включая фрукты и ягоды.

Во-вторых, в рамках кластеризации не рассматривались особенности деятельности фермерских хозяйств, которые, в отличие от сельскохозяйственных организаций, не располагают развитой инфраструктурой сбыта продукции и поэтому более чувствительны к колебаниям объемов производства [28]. Для решения этой проблемы следует сфокусироваться на возможностях организаций розничной торговли по поддержке реализации фермерской продукции.

В-третьих, различия в региональном потреблении фруктов и ягод во многом зависят от потребительских цен и доходов населения [29]. Население с наибольшими располагаемыми ресурсами (включающими доходы, а также израсходованные накопления и привлеченные или заемные средства) потребляет плодов и ягод в 2,4 раза больше, чем малообеспеченное [30]. Необходимо продолжение исследований, направленных на оценку влияния цен и доходов на потребление фруктов и ягод. Анализ взаимосвязи потребления, доходов и цен особенно актуален в связи с высокой долей расходов домашних хозяйств на покупку продуктов питания в общей структуре потребительских расходов и её заметной региональной дифференциацией [19], а также в связи с тем, рост цен на продовольствие является одной из проблем обеспечения населения плодово-ягодной продукцией [31]. Решение этой проблемы возможно за счет развития прямых хозяйственных связей розничных торговых организаций и производителей, а также расширения сети оптовых продовольственных рынков [32].

В-четвертых, потребление фруктов и ягод зависит также и от пищевых привычек населения. Для учета этого фактора необходима популяризация потребления фруктов и ягод среди населения.

В-пятых, необходимо учитывать также специализацию регионов на конкретных фруктах и ягодах. Например, если условия в Краснодарском крае подходят для выращивания клубники, то в Красноярском крае – оптимальны для «северных» ягод, то есть облепихи, клюквы, брусники и др. Межрегиональный обмен обеспечит разнообразие потребления фруктов и ягод в разных регионах России. Более того, А.И Пшенцова [33] отмечает ведущую роль РФ на международном рынке крыжовника, малины и смородины, позволяющую рассчитывать на развитие их экспорта в условиях низкой конкуренции.

Выводы. Обеспечение населения регионов продовольствием, включая фрукты и ягоды, является комплексной задачей, решение которой в контексте необходимости достижения национальной продовольственной безопасности требует межрегионального и межотраслевого взаимодействия.

В результате проведенной кластеризации выделены четыре кластера и два уникальных региона.

В регионах первого кластера при относительно небольшом уровне самообеспечения и ввозе из других регионов население обеспечивается фруктами и ягодами во многом благодаря импорту. По мере развития отечественного производства целесообразно частичное замещение импорта поставками фруктов и ягод из российских регионов. Сохранение импорта из дружественных стран необходимо в той мере, которая будет согласовываться с достижением порогового значения уровня самообеспечения страны.

Второй кластер наиболее проблемный. Он характеризуется низким уровнем самообеспечения, малыми объемами ввоза из других российских регионов и низким потреблением фруктов и ягод населением. Для обеспечения дальневосточных и сибирских регионов кластера фруктами и ягодами, несмотря на необходимость снижения доли импорта на национальном уровне, целесообразно рассмотреть возможность их более активного ввоза из близлежащих азиатских стран, дружественных РФ. Регионы кластера, расположенные в европейской части страны, должны стать главными объектами ввоза фруктов и ягод из других российских регионов по мере наращивания отечественного производства.

Регионы третьего кластера, а также Кабардино-Балкарская Республика и Краснодарский край, имеют высокий уровень самообеспечения. Для них актуальна государственная поддержка производства фруктов и ягод с целью дальнейшего наращивания его объемов, повышения качества продукции, совершенствования производственной, логистической, информационной инфраструктуры. Задача регионов третьего кластера состоит на только в обеспечении фруктами и ягодами своего населения, но и жителей других регионов РФ.

Регионы четвертого кластера обеспечивают свои потребности во фруктах и ягодах за счет ввоза – как из других регионов РФ, так и из других стран. Дальнейшая работа может быть направлена на повышение и сохранение качества ввозимой продукции, в частности, при сборке и доставке онлайн-заказов, сдерживание роста потребительских цен, расширение доступного ассортимента за счет новых для жителей РФ экзотических фруктов, популяризации потребления фруктов и ягод как продуктов для здорового питания.

Не вызывает сомнений, что для обеспечения продовольственной независимости и продовольственной безопасности государства крайне важно развитие агропромышленного производства. Однако одновременно актуальна задача межрегионального распределения произведенной продукции. Повышение эффективности агропромышленного производства в совокупности с развитием межрегиональной торговли, а также импортом из дружественных стран, позволят обеспечить наличие и доступность фруктов и ягод населению всех регионов, снизить региональную дифференциацию по их потреблению, будут способствовать улучшению питания и здоровья всех граждан независимо от территории проживания.

Литература

1. Продовольственная независимость России: современное состояние, риски безопасности, перспективные тренды / В.Г. Закшевский, И.П. Богомолова, И.Н. Василенко и др. // Продовольственная политика и

безопасность. 2023. №1. С.9-28. doi: 10.18334/ppib.10.1.116696.

2.Современное состояние продовольственной безопасности Российской Федерации / А.Д. Косьмин, О.П. Кузнецова, В.В. Кузнецов и др. // Продовольственная политика и безопасность. 2023. №1. С.29-48. doi: 10.18334/ppib.10.1.116664.

3.Щетинина И.В. Достигла ли Россия продовольственной безопасности? // ЭКО. 2024. №6. С.258-280. doi: 10.30680/ECO0131-7652-2024-6-258-280.

4.Велибекова Л.А. Обеспечение населения России отечественной плодово-ягодной продукцией // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2023. №4. С.157-171. doi: 10.26897/0021-342X-2023-4-157-171.

5.Суглобов А.Е., Адукова А.Н. Самообеспечение плодово-ягодной продукцией: вклад хозяйств населения // Экономика сельского хозяйства России. 2024. №10. С.62-71. doi: 10.32651/2410-68.

6.Иваненко И.С. Оценка продовольственной безопасности регионов Приволжского федерального округа // Проблемы развития территории. 2021. №3. С.89-106. doi: 10.15838/ptd.2021.3.113.6.

7.Алтухов А.И. Регион в системе обеспечения продовольственной безопасности страны: методологический аспект // Агропродовольственная политика России. 2016. № 2. С.2-7.

8.Алтухов А.И. Межрегиональный обмен в системе продовольственного обеспечения страны // Экономика сельского хозяйства России. 2017. №1. С.61-70.

9.Losilla Solano L.V., Brümmer B., Engler A., Otter V. Effects of intra- and inter-regional geographic diversification and product diversification on export performance: Evidence from the Chilean fresh fruit export sector // Food Policy. 2019. P. 101730. doi: 10.1016/j.foodpol.2019.101730.

10.Turner G., Green R., Alae-Carew C., Dangour A.D. The association of dimensions of fruit and vegetable access in the retail food environment with consumption; a systematic review // Global Food Security. 2021. P. 100528. doi: 10.1016/j.gfs.2021.100528.

11.Продовольственная безопасность: меры финансовой господдержки устойчивого развития сельского хозяйства регионов России / А.И. Бородин, И.Ю. Выгодчикова, Е.И. Дзюба и др. // Финансы: теория и практика. 2021. №2. С.35-52. doi: 10.26794/2587-5671-2021-25-2-35-52.

12.Жилина Е.В., Ханова И.М. Кластеризация субъектов Российской Федерации по уровню продовольственной безопасности // АПК: экономика, управление. 2023. №5. С.12-20. doi: 10.33305/235-12.

13.Мельников Б.А. Оценка рисков межрегионального обмена и импорта продовольствия // Экономика сельского хозяйства России. 2024. №1. С.85-92. doi: 10.32651/241-85.

14.Красильникова Е.А., Брагин Л.А. Структура товарных ресурсов Российской Федерации как основа формирования базового ассортимента торговли // Российское предпринимательство. 2018. №3. С.633-642. doi: 10.18334/rp.19.3.38821.

15.Мухаметзянов Р. Р., Джанчарова Г.К., Арзамасцева Н.В. Изменение объемов производства фруктов, ягод и винограда в России // Экономика сельского хозяйства России. 2022. №9. С.67-72. doi: 10.32651/229-67.

16.Assessing food self-sufficiency of selected European Functional Urban Areas vs metropolitan areas / M. Sylla, M. Świąder, J. L. Vicente-Vicente et al. // Landscape and Urban Planning. 2022. P. 104584. doi: 10.1016/j.landurbplan.2022.104584.

17.Суглобов А.Е., Адукова А.Н. Самообеспечение плодово-ягодной продукцией: состояние, проблемы, направления их решения // Экономика сельского хозяйства России. 2023. №9. С.54-63. doi: 10.32651/239-54.

18.Аксенов И.А. Анализ динамики международных торговых операций на рынке овощей и фруктов в России // Овощи России. 2020. №1. С.86-93. doi: 10.18619/2072-9146-2020-1-86-93.

19.Аликперова Н.В., Ярашева А.В. Потребление продуктов питания: региональная дифференциация // Региональные проблемы преобразования экономики. 2023. №8. С.65-74. doi:10.26726/1812-7096-2023-8-65-74.

20.Зубков А.В., Тиссен М.В. Рынок фруктов и ягод в России: состояние и перспективы развития // Аграрный вестник Верхневолжья. 2016. №2. С.73-78.

21.Мухаметзянов Р.Р. Развитие плодово-ягодного рынка России // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2012. №1. С.17-25.

22.Блануца В.И. Пространственная алгоритмическая предвзятость в социально-экономической кластеризации российских регионов // Пространственная экономика. 2024. №2. С.71-92. doi: 10.14530/se.2024.2.071-092

23.Кетова К.В., Касаткина Е.В., Вавилова Д.Д. Кластеризация регионов Российской Федерации по уровню социально-экономического развития с использованием методов машинного обучения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2021. №6. С.70-85. doi: 10.15838/esc.2021.6.78.4.

24.Шестаков Р.Б., Ловчикова Е.И. Кластеризация регионов на основе базовых аграрноэкономических критериев // Экономика региона. 2023. №1. С.178-191. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-1-14.

25.Галиева Г.М., Гафарова Е.А. Оценка потенциала сельского хозяйства в регионах России // Экономика сельского хозяйства России. 2020. №9. С.24-28. doi: 10.32651/209-24.

26.Демичев В.В. Статистический анализ эффективности сельского хозяйства с применением методов машинного обучения // Экономика сельского хозяйства России. 2022. №9. С.100-105. doi: 10.32651/229-100.

27.Шокина М.О. Применение алгоритма k-means++ для кластеризации последовательностей с неизвестным количеством кластеров // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. №20. С.160-163.

28.Исследование социальных функций торговли по поддержке развития товарности фермерской продукции / А. Ф. Никишин, О. С. Каращук, Е. А. Майорова и др. // Аграрная наука. 2024. №9. С.146-151. doi: 10.32634/0869-8155-2024-386-9-146-151.

29.Аганбегян А.Г. Преодоление бедности и сокращение неравенства по доходам и потреблению в России // ЭКО. 2017. №9. С.66-84.

30.Велибекова Л.А. Экономические аспекты производства и потребления свежей и переработанной плодово-ягодной продукции // АПК: экономика, управление. 2022. №6. С.72-80. doi: 10.33305/226-72.

31.Велибекова Л.А. Роль плодового подкомплекса в обеспечении продовольственной безопасности: теоретические и практические аспекты // Экономика сельского хозяйства России. 2024. №3. С.82-93. doi: 10.32651/243-82.

32.Исследование развития роли торговли в обеспечении населения продовольственными товарами в России / Л. А. Брагин, О. С. Каращук, Т. В. Панкина и др. // АПК: экономика, управление. 2024. №10. С.77-88. doi: 10.33305/2410-77.

33.Пшенцова А.И. Мировое производство фруктов и ягод и место России в нём // Менеджмент в АПК. 2024. №2. С.29-35. doi: 10.35244/2782-3776-2024-4-2-29-35.

Сведения об авторах:

Суглобов Александр Евгеньевич – доктор экономических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, руководитель филиала, e-mail: a_suglobov@mail.ru
Всероссийский научно-исследовательский институт организации производства, труда и управления в сельском хозяйстве (филиал ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ), Москва, Россия.
Майорова Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент базовой кафедры торговой политики, e-mail: mayorova.ea@rea.ru
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия.
Лясников Николай Васильевич – доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории моделирования евразийской интеграции[1], профессор[2], e-mail: acadra@yandex.ru
[1]Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Президентская академия (РАНХиГС), Москва, Россия.
Абрамов Егор Геннадьевич – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник лаборатории цифровой экономики, e-mail: abramov@ipr-ras.ru
Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, Москва, Россия.
Джикия Мери Константиновна – кандидат экономических наук, доцент кафедры статистики и кибернетики, e-mail: marydzhikia@list.ru
Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

FRUIT AND BERRY SUPPLY TO REGIONAL POPULATIONS: A CLUSTER APPROACH

A. E. Suglobov, E. A. Mayorova, N. V. Lyasnikov, E. G. Abramov, M. K. Dzhikiya

Abstract. Russian population has been experiencing a fruit consumption deficit for many years. Fruits and berries exhibit the largest gap between the actual (44.6%) and the threshold (60%) self-sufficiency level for 2023, and the highest average underconsumption among other products across the country, at approximately 66 kg per person, compared to a rational norm of 100 kg per person. However, average estimates do not reflect the situation in individual regions, so authors clustered the regions based on indicators characterizing the production, distribution, and consumption of fruit and berries. This resulted in the identification of four clusters and two atypical regions. The first cluster included 40 regions (47%), including the European part of the country, the Siberian federal district and Far Eastern federal district. The second cluster included 32 regions (approximately 38%). These regions produce less than one-third of the fruit and berry volume consumed. In addition, consumption in the second cluster is lower than the national average. Imports could improve self-sufficiency here. The third cluster included six regions in the central and southern parts of the Russian Federation with over 100% self-sufficiency but insufficient consumption due to exports. These regions could become the foundation for ensuring the country's food security. The fourth cluster included Moscow, St. Petersburg and Moscow, Leningrad and Nizhny Novgorod regions. Here, despite a lower level of self-sufficiency, high consumption is ensured by importing fruits and berries from other regions and countries. Efforts should be made to improve logistics and control prices. Two unique regions – Kabardino-Balkarian Republic and Krasnodar Krai – are the only ones where rational fruit and berry consumption standards are met; they are the driving force behind ensuring the country's food security in terms of fruits and berries.

Key words: fruit and berry availability, regional disparities, cluster analysis, food security.

References

1. Zakshevskiy VG, Bogomolova IP, Vasilenko IN. [Russia's food independence: current state, security risks, and promising trends]. Prodovolstvennaya politika i bezopasnost. 2023; 1. 9-28 p. doi: 10.18334/ppib.10.1.116696.

2. Kosmin AD, Kuznetsova OP, Kuznetsov VV. [Current state of food security in the Russian Federation]. Prodovolstvennaya politika i bezopasnost. 2023; 1. 29-48 p. doi: 10.18334/ppib.10.1.116664.

3. Shchetinina IV. [Has Russia achieved food security?]. EKO. 2024; 6. 258-280 p. doi: 10.30680/ECO0131-7652-2024-6-258-280.

4. Velibekova LA. [Provision of Russia's population of with domestic fruit and berry products]. Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2023; 4. 157-171 p. doi: 10.26897/0021-342X-2023-4-157-171.

5. Suglobov AE, Adukova AN. [Self-sufficiency in fruit and berry products: contribution of households]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2024; 10. 62-71 p. doi: 10.32651/2410-68.

6. Ivanenko IS. [Food security assessment in the regions of Volga Federal district]. Problemy razvitiya territoriy. 2021; 3. 89-106 p. doi: 10.15838/ptd.2021.3.113.6.

7. Altukhov AI. [The region in the country's industrial safety system: a methodological aspect]. Agroprodovolstvennaya politika Rossii. 2016; 2. 2-7 p.

8. Altukhov AI. [Interregional exchange in the country's food supply system]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2017; 1. 61-70 p.

9. Losilla Solano LV, Brummer B, Engler A, Otter V. Effects of intra- and inter-regional geographic diversification and product diversification on export performance: Evidence from the Chilean fresh fruit export sector. Food Policy. 2019; 101730 p. doi: 10.1016/j.foodpol.2019.101730.

10. Turner G, Green R, Alae-Carew C, Dangour AD. The association of dimensions of fruit and vegetable access in the retail food environment with consumption; a systematic review. Global Food Security. 2021; 100528 p. doi: 10.1016/j.gfs.2021.100528.

11. Borodin AI, Vygodchikova IYu, Dzyuba EI. [Food security: state financial support measures for sustainable development of agriculture in Russian regions]. Finansy: teoriya i praktika. 2021; 2. 35-52 p. doi: 10.26794/2587-5671-2021-25-2-35-52.

12. Zhilina EV, Khanova IM. [Clustering of subjects of the Russian Federation by level of food security]. APK: ekonomika, upravlenie. 2023; 5. 12-20 p. doi: 10.33305/235-12.
13. Melnikov BA. [Risk assessment of interregional food exchange and imports]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2024; 1. 85-92 p. doi: 10.32651/241-85.
14. Krasilnikova EA, Bragin LA. [The structure of commodity resources of the Russian Federation as a basis for the formation of trade basic assortment]. Rossiyskoe predprinimatelstvo. 2018; 3. 633-642 p. doi: 10.18334/rp.19.3.38821.
15. Mukhametzyanov RR, Dzhancharova GK, Arzamastseva N.V. [Changes in the production volumes of fruits, berries and grapes in Russia]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2022; 9. 67-72 p. doi: 10.32651/229-67.
16. Sylla M, Swiąder M, Vicente-Vicente JL. Assessing food self-sufficiency of selected European Functional Urban Areas vs metropolitan areas. Landscape and Urban Planning. 2022; 104584 p. doi: 10.1016/j.landurbplan.2022.104584.
17. Suglobov AE, Adukova AN. [Self-sufficiency in fruit and berry products: status, problems and directions for solution]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2023; 9. 54-63 p. doi: 10.32651/239-54.
18. Aksenov IA. [Analysis of international trade operations dynamics of fruit and vegetable market in Russia]. Ovoshchi Rossii. 2020; 1. 86-93 p. doi: 10.18619/2072-9146-2020-1-86-93.
19. Alikperova NV, Yarasheva AV. [Food consumption: regional differentiation]. Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki. 2023; 8. 65-74 p. doi:10.26726/1812-7096-2023-8-65-74.
20. Zubkov AV, Tissen MV. [Fruit and berry market in Russia: state and development prospects]. Agrarnyy vestnik Verkhnevolzhya. 2016; 2. 73-78 p.
21. Mukhametzyanov RR. [Development of fruit and berry market in Russia]. Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2012; 1. 17-25 p.
22. Blanutsa VI. [Spatial algorithmic bias in social and economic clustering of Russian regions]. Prostranstvennaya ekonomika. 2024; 2. 71-92 p. doi: 10.14530/se.2024.2.071-092
23. Ketova KV, Kasatkina EV, Vavilova DD. [Clustering of regions of the Russian Federation by level of social and economic development using machine learning methods]. Ekonomicheskie i sotsialnye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz. 2021; 6. 70-85 p. doi: 10.15838/esc.2021.6.78.4.
24. Shestakov RB, Lovchikova EI. [Clustering of regions based on basic agrarian-economic criteria]. Ekonomika regiona. 2023; 1. 178-191 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-1-14.
25. Galieva GM, Gafarova EA. [Assessing the potential of agriculture in Russian regions]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2020; 9. 24-28 p. doi: 10.32651/209-24.
26. Demichev VV. [Statistical analysis of agricultural efficiency using machine learning methods]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2022; 9. 100-105 p. doi: 10.32651/229-100.
27. Shokina MO. [Application of k-means++ algorithm for clustering sequences with an unknown number of clusters]. Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh. 2017; 20. 160-163 p.
28. Nikishin AF, Karashchuk OS, Mayorova EA. [Study of the social functions of trade in supporting the development of farm products marketability]. Agrarnaya nauka. 2024; 9. 146-151 p. doi: 10.32634/0869-8155-2024-386-9-146-151.
29. Aganbegyan AG. [Overcoming poverty and reducing income and consumption inequality in Russia]. EKO. 2017; 9. 66-84 p.
30. Velibekova LA. [Economic aspects of production and consumption of fresh and processed fruit and berry products]. APK: ekonomika, upravlenie. 2022; 6. 72-80 p. doi: 10.33305/226-72.
31. Velibekova LA. [Role of fruit subcomplex in ensuring food security: theoretical and practical aspects]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2024; 3. 82-93 p. doi: 10.32651/243-82.
32. Bragin LA, Karashchuk OS, Pankina TV. [Study of trade role development in providing the population with food products in Russia]. APK: ekonomika, upravlenie. 2024; 10. 77-88 p. doi: 10.33305/2410-77.
33. Pshentsova AI. [World production of fruits and berries and Russia's place in it]. Menedzhment v APK. 2024; 2. 29-35 p. doi: 10.35244/2782-3776-2024-4-2-29-35.

Authors:

Suglobov Aleksandr Evgenevich – Doctor of Economic Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Branch Director, e-mail: a_suglobov@mail.ru
All-Russian Research Institute for Organization of Production, Labor and Management in Agriculture (branch of Federal Scientific Center All-Russian Research Institute of Agricultural Sciences), Moscow, Russia.
Mayorova Elena Aleksandrovna – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor of Trade Policy Department, e-mail: mayorova.ea@rea.ru
Russian University of Economics named after G.V.Plekhanov, Moscow, Russia.
Lyasnikov Nikolay Vasilievich – Doctor of Economic Sciences, Professor, chief researcher of the Eurasian Integration Modeling Laboratory[1], Professor[2], e-mail: acadra@yandex.ru
[1]Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]Presidential Academy (Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration), Moscow, Russia.
Abramov Egor Gennadievich – Ph.D. of Economic Sciences, senior researcher of Digital Economy Laboratory, e-mail: abramov@ipr-ras.ru
Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Dzhikiya Meri Konstantinovna – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Statistics and Cybernetics, e-mail: marydzhikia@list.ru
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia.

DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-161-167
УДК 332.133.6

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ХМЕЛЕВОДСТВА В ЧУВАШСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

М. Л. Толстова, А. Е. Корнилова

Реферат. Хмелеводство в Российской Федерации является отраслью агропромышленного комплекса, которая в значительной степени зависит от импорта технологических решений и продуктов, отсутствие производства которых в стране приводит к формированию серьезных барьеров для интенсификации отечественного производства и переработки хмеля. Чувашская Республика выступает основным хмелепроизводящим регионом страны по группе горько-ароматических сортов, что обуславливает реализацию в регионе системных мер по научно-технологическому сопровождению развития производственно-экономического потенциала хмелеводства. На основании исследования современной региональной модели научно-технологической поддержки развития хмелеводства авторами выявлены основные направления функционирования – от концепции реализации непрерывного аграрного образования и научных исследований до работы селекции новых сортов хмеля и разработки перспективных специализированных машин и механизмов. В Чувашской Республике выстроено эффективное взаимодействие между участниками системы сопровождения, которые представлены как федеральными, так и региональными учреждениями. В регионе активно формируются новые компетенции, связанные с научно-технологическим сопровождением инвестиционных проектов в хмелеводстве, данное направление отдельно выделено в государственной программе научно-технологического развития региона. Результаты анализа имеющихся в Чувашии мер поддержки научно-технологического сопровождения хмелеводства свидетельствуют об их достаточности и комплексности на современном этапе, а также о возможности их корректировки с учетом изменения приоритетов. Авторы выделяют в качестве приоритетных направлений повышения эффективности научно-технологического обеспечения развития производственно-экономического потенциала хмелеводства внедрение биотехнологических инструментов в селекцию хмеля, а также разработка и реализация перспективной системы глубокой переработки хмеля.

Ключевые слова: хмелеводство, научно-технологическое сопровождение, интенсификация, производственно-экономический потенциал, государственная поддержка, технологический суверенитет.

Введение. В современных условиях отрасль хмелеводства является одним из важных направлений обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации. По данным Росстата, валовой сбор хмеля в сельскохозяйственных организациях в 2024 году составил 328,8 т [1], в то время как сырьевая емкость пивоваренной отрасли государства в хмеле по оценкам экспертов составляет от не менее 7-8 тыс. т по данным Торгово-промышленной палаты [2], до 10 тыс. т по мнению аналитиков АО «Россельхозбанк» [3]. Указанные данные свидетельствуют о высокой степени импортозависимости российской пивоваренной промышленности от импорта хмеля и о высоких рисках снижения объемов производства в следствии возможного санкционного давления на отрасль со стороны недружественных стран. Соответственно, важнейшей задачей развития отрасли в современных условиях является наращивание объемов и качества производства хмеля, а также обеспечение технологического суверенитета в области хмелеводства.

Чувашская Республика – исторический и современный лидер российского хмелеводства по группе горько-ароматических сортов. Её успешный опыт может быть адаптирован и внедрён в других регионах с учётом природно-климатических, производственных, экономических условий. Для масштабирования отрасли, углубления импортозамещения, обеспечения технологического суверенитета наряду с интенсификацией производства необходимо сформировать действенную и эффективную систему научно-технологического сопровождения развития производственно-экономического потенциала отрасли. При этом стоит отметить, что в экономической литературе вопросам научно-технологического обеспечения развития хмелеводства отражены в незначительном объеме.

Научная и прикладная значимость формирования и реализации системы научно-технологического сопровождения интенсификации хмелеводства заключается в оценке инструментов поддержки отрасли, в частности, кадрового потенциала, инженерно-агротехнологического обеспечения, научных исследований и разработок, а также внедрение цифровых технологий в хмелеводство с учетом имеющихся проблем и вызовов. Целью исследования является изучение современного состояния региональной системы научно-технологического сопровождения развития производственно-экономического потенциала хмелеводства и разработка перспективных направлений по повышению ее эффективности.

Условия, материалы и методы. Настоящее исследование построено на принципах системного подхода и имеет описательно-аналитический характер. Для достижения поставленной цели был применен комплекс взаимодополняющих общенаучных и специальных методов, обеспечивающих достоверность выводов. Общая методологическая основа сформирована в ходе всестороннего теоретического анализа научной литературы, включая труды ведущих отечественных и зарубежных

ученых в области экономико-технологического обеспечения переработки хмеля.

В качестве ключевого инструмента диагностики текущего состояния и определения стратегических тенденций отрасли использовался структурно-ситуационный анализ. Этот метод позволил провести комплексную оценку региональной системы научно-технологического сопровождения хмелеводства как системы взаимосвязанных элементов (кадры, наука, технология, рынок) во взаимосвязи с внутренними и внешними рисками.

Эмпирическую основу работы составили несколько групп источников. Были использованы данные официальной государственной статистики (Росстат, Минсельхоз России), а также региональная ведомственная отчетность Министерства сельского хозяйства Чувашской Республики. Дополнительно привлекались открытые отраслевые данные: публикации в специализированных изданиях, отраслевые обзоры, материалы научных конференций и информация с авторитетных электронных ресурсов. Важную роль в интерпретации статистических тенденций сыграли аналитические отчеты исследовательских агентств и экспертные оценки.

Результаты и обсуждение. Научно-технологическое сопровождение отрасли, по нашему мнению, представляет собой комплекс мероприятий, основанных на использовании кадрового и научного потенциала, обеспечивающий эффективность всех технологических процессов развития отрасли, и в целом, влияющий на уровень ее интенсификации. Данный вид сопровождения является важным ресурсом развития любой отрасли, но на современном этапе развития хмелеводства, с учетом критического уровня зависимости от технологий и ресурсов из зарубежных стран, говорить о дальнейшем функционировании хмелеводства без комплексного научно-технологического сопровождения не представляется возможным.

Научно-технологическое сопровождение хмелеводства в СССР представляло собой целостную модель, сочетавшую централизованное институциональное развитие с импортом критических технологий из стран СЭВ. Экономическая результативность этой модели была высокой, но её устойчивость оказалась зависимой от общегосударственной политики и сохранения международных кооперационных цепочек, нарушение которых, в том числе, привело к практически полной деградации отрасли в постсоветский период.

Истоки становления хмелеводства на территории Чувашской Республики уходят в период индустриализации сельского хозяйства 1930-х годов. Определение данной культуры в качестве ключевого регионального сельскохозяйственного направления было детерминировано совокупностью подходящих агроклиматических факторов, включающих оптимальный баланс тепла и влаги, а также характеристики почвы. Немаловажную роль сыграла и значительная плотность сельского населения, обеспечивающая необходимый трудовой ресурс для этой высокоинтенсивной отрасли.

Пик развития отрасли пришелся на середину 1980-х годов. В этот период валовый сбор хмеля позволял обеспечивать свыше 80% потребностей пивоваренной промышленности СССР. Под специализированными хмельниками было занято порядка 3 тысяч гектаров сельскохозяйственных угодий. Селекционно-сортовая политика была ориентирована на возделывание отечественных горько-ароматических сортов, адаптированных к местным условиям.

Научно-технологическое обеспечение отрасли имело комплексный характер. В Чувашии был создан специализированный отраслевой научно-исследовательский институт, координирующий селекционную работу и внедрение агротехнологий. Производственная структура отличалась сочетанием крупных организованных форм и децентрализованного труда: наряду с 170 специализированными хмелеводческими совхозами и колхозами существенный вклад в сырьевую базу вносили личные подсобные хозяйства населения.

Последующая трансформация отрасли в постсоветский период, привела к существенному спаду производственных мощностей и утрате Чувашией лидирующих позиций в отечественном хмелеводстве. Данный процесс отражает общие тенденции дезинтеграции специализированных аграрных систем, характерные для 1990-2000-х годов [4].

Основными вызовами, стоящими перед современной региональной системой научно-технологического сопровождения развития производственно-экономического потенциала отрасли, являются следующие:

- недостаточный уровень кадрового обеспечения отрасли, в том числе и научными сотрудниками;
- низкий уровень обеспечения качественным и чистосортным посадочным материалом, в том числе отечественной селекции;
- недостаточный уровень внедрения современных ресурсосберегающих технологий, а также низкий уровень цифровизации отрасли;
- отсутствие комплексной отечественной линейки машин и оборудования для возделывания, сушки, уборки и переработки хмеля.

Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 года № 529 утверждены приоритетные направления научно-технологического развития, одним из которых является высокопродуктивное и устойчивое к изменениям природной среды сельское хозяйство. Для Чувашской Республики как региона с сильно выраженной аграрной специализацией применительно к развитию хмелеводства важными являются такие важнейшие наукоемкие технологии как технологии получения устойчивых к изменениям природной среды новых сортов и гибридов растений, технологии создания биологических и химических средств для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и их защиты от болезней и вредных организмов.

Следует отметить, что именно на решение

указанных проблем направлен новый национальный проект «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», реализация которого началась в России с 2025 года. Как минимум, три из пяти федеральных проектов ориентированы в том числе и на ускоренное развитие хмелеводческой отрасли – «Научные разработки в селекции и генетике», «Техническая и технологическая независимость сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности» и «Кадры в АПК». Целью национального проекта является повышение технологической обеспеченности продовольственной безопасности для создания условий устойчивого роста производства, что тоже определяет развитие производственно-экономического потенциала хмелеводства как важнейший результирующий показатель.

Субъекты Российской Федерации в целях научно-технологического обеспечения социально-экономического развития утверждают региональные программы научно-технологического развития. Следует отметить, что в рамках государственной программы научно-технологического развития Чувашской Республики с учетом специализации региона направление «Хмелеводство», включающее в себя селекционное и технологическое развитие, выделено в отдельный приоритет научно-технологического развития субъекта РФ.

В рамках выделенного направления одним из основных мероприятий определено совершенствование имеющейся в регионе системы научно-технологического сопровождения развития производственно-экономического потенциала хмелеводства в Чувашской Республике. В качестве механизма повышения эффективности предлагается усилить взаимодействие между участниками процессов сопровождения и основными заказчиками посредством реализации совместных научно-технологических проектов и образовательных программ, внедрение в процессы сопровождения лучших практик из опыта других регионов (хозяйствующих субъектов).

Основной платформой, определяющей направления и приоритеты, государственную поддержку научно-технологического сопровождения (табл. 1) интенсификации отрасли, выступает Научно-технический совет при Главе Чувашской Республики. Совет создан для координации работы в области развития приоритетных направлений и проектов в сфере науки, технологий и высшего образования в интересах научно-технологического и социально-экономического развития Чувашской Республики, формированием и практической реализацией научно-технической, технологической политики в Чувашской Республике.

Таблица 1 – Характеристика основных участников системы научно-технологического сопровождения развития хмелеводства в Чувашской Республике

Участник	Направление/область участия	Ресурсы
Чувашский государственный аграрный университет	- подготовка кадров по программам высшего образования и научных кадров; - технологическое обеспечение (селекция, инженерная модернизация, агротехника)	- центр компетенций «Чувашия –центр производства хмеля»; - передовая лабораторная инфраструктура; - учебно-опытные хмелеплантации; - конструкторское бюро
Чувашский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»	- подготовка научных кадров; - технологическое обеспечение (селекция); - стажировка обучающихся техникумов и Чувашский ГАУ	- центр коллективного пользования «Мировая коллекция хмеля»; - опытные /экспериментальные хмелеплантации
Автономное учреждение Чувашской Республики «Агро-Инновации»	- технологическое обеспечение (агротехника); - консультационное сопровождение по господдержке	- центр компетенций развития сельскохозяйственной кооперации; - консультационная служба
Чувашский филиал ФГБУ «Центр Агроаналитики»	- консультационное сопровождение ценовой ситуации, рынкам сбыта, сырьевого обеспечения; - экспертное сопровождение отрасли	- оператор федеральных информационных систем в сфере АПК; - участие в крупных аналитических проектах в агросекторе
Единый региональный агротехнологический техникум	- подготовка по программам среднего специального образования, рабочих профессий; - технологическое обеспечение (инженерная модернизация, агротехника)	- научно образовательная инфраструктура; - опытные и промышленные хмелеплантации

В состав Совета включены руководители органов исполнительной власти Чувашской Республики, руководители отраслевых ассоциаций, представители вузов и экспертных организаций. Особое внимание в деятельности Совета уделяется прикладным вопросам научно-технологического развития республики по отраслевому принципу, а также стимулированию развития приоритетных отраслей через мотивационные механизмы.

Основным элементом региональной системы научно-технологического сопровождения в Чувашской Республике является состав участников, поскольку именно от компетентности,

ресурсного обеспечения, слаженности действий, зависит конкретный результат поддержки отрасли. Отличительной особенностью региона является сочетание в рамках сопровождения деятельности как образовательных и научных организаций федерального подчинения, так и региональных образовательных и консультационных структур.

В основе региональной системы научно-технологического развития производственно-экономического потенциала отрасли лежит проблема кадрового обеспечения. На сегодняшний день хмелеводство является достаточно емким в части трудовых ресурсов направлением растениеводства. Усугубляет ситуацию невысокий уровень механизации и автоматизации производственных процессов. Производство и переработка хмеля в основном располагается на площадках в сельской местности, и соответственно вопросы обеспечения технологических процессов рабочей силой приобретают особую актуальность. Представители профессионального сообщества акцентируют внимание на недостаточности работников и специалистов по агротехнике хмеля, а также селекционеров, специализирующихся на сортах новой селекции, востребованных предприятиями пивоваренной промышленности.

В регионе функционирует система непрерывного аграрного образования, которая охватывает все звенья системы подготовки – от дошкольного до высшего образования и учреждений повышения квалификации. С учетом важности развития хмелеводства, специализированные отраслевые составляющие внедряются в агротехнологические классы, учреждения среднего профессионального образования (единый региональный аграрный техникум) и в Чувашский государственный аграрный университет (далее вуз). Так, например, в 2025 году в вузе состоялось открытие двух специализаций, связанных с хмелеводством, в рамках существующих программ магистратуры по агрономическому и агроинженерному направлениям. Образовательные программы разрабатываются с учетом требований индустриальных партнеров вуза – ведущих хмелеводческих хозяйств региона и страны, а также предприятий пивоваренной отрасли.

Кроме этого, на базе вуза уже несколько лет специализированная программа повышения квалификации, обучение на которой прошли более 120 специалистов из более чем 20 регионов Российской Федерации. Образовательные программы в области хмелеводства распространяются также и на одну из важнейших движущих сил сельского хозяйства – фермерское движение. Именно для них АО «Россельхозбанк» запустил в Чувашии 5-й поток образовательного проекта «Школа фермера» по направлению «Хмелеводство» [5].

Подготовка кадров высшей научной квалификации, обеспечивающих научно-технологическое развитие отрасли хмелеводства, осуществляется совместно вузом и Чувашским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства – филиалом ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (Чувашский НИИСХ) по заявкам центром компетенций, научных учреждений, предприятий АПК и сельскохозяйственного машиностроения. Наличие научных школ, диссертационных советов, а также комплексной научно-производственной инфраструктуры для осуществления исследований позволяет реализовывать как фундаментальные, так и прикладные научные проекты, опираясь на потребности отраслевого бизнеса.

Важнейшими направлениями реализации системы научно-технологического развития производственно-экономического потенциала хмелеводства в Чувашской Республике являются селекция и технологическая модернизация.

Недостаточное обеспечение потребностей хмелеводства качественным, чистосортным и оздоровленным посадочным материалом является серьезным препятствием для развития хмеля [6, 7, 8]. Объединение усилий вуза и НИИ позволило в короткие сроки организовать работу в данном направлении. Научные исследования в области селекции, и в целом, формирования процедур лабораторных исследований в хмелеводстве, способствовали появлению в государственном реестре селекционных достижение новых сортов хмеля «Сувар», «Ароматный» и др.

Также в структуре Центра компетенций «Чувашия – центр производства хмеля» при государственной поддержке из федерального и регионального бюджетов сформирована передовая лабораторная инфраструктура, способствующая расширению спектра и повышению качества научных исследований.

В области технологической модернизации основной задачей на среднесрочную перспективу является разработка комплексной линейки специализированной техники и агрегатов для хмелеводства с возможностью организации и локализации производства в Российской Федерации. Данное направление закреплено за Чувашским государственным аграрным университетом и предприятием «Техмашхолдинг», которое произвело первый отечественный хмелеуборочный комплекс, интегрированный с хмелесушилкой. Также на площадке центра компетенций во взаимодействии с хмелеводческими предприятиями организована работа по разработке и внедрению новых видов агрегатов для хмелеводства по заказу бизнес-сообщества.

Анализ международных и российских тенденций развития хмелеводства показывает высокий уровень зависимости отечественного рынка не только от техники и посадочного материала, но и от технологий, особенно биохимического анализа и глубокой переработки. Считаем необходимым выделить эти направления как основные для расширения области научно-технологического сопровождения на региональном уровне.

Усиление имеющегося в регионе научно-лабораторного потенциала дополнительным оборудованием и компетенциями позволит провести анализ имеющихся в мировой

практике процедур анализа хмеля, а также разработать отечественные методики биохимического анализа, которые позволят проводить более широкий комплекс аналитических исследований, востребованных как производителями хмеля, так и пивоваренной промышленностью [9].

Технологическая модернизация, по нашему мнению, должна быть ориентирована на изучение и внедрение производств по глубокой переработке хмеля методом экстрагирования, что позволяет снизить критический уровень импортозависимости в данном виде продукте [10].

Считаем, что имеющийся инструментарий поддержки научно-технологического сопровождения (табл. 2) достаточен для развития данной системы, с учетом корректировки приоритетов [11].

Таблица 2 – Меры поддержки научно-технологического сопровождения хмелеводства в Чувашской Республике

Наименование	Источник финансирования	Характеристика
Грант «Чувашский хмель»	Региональный бюджет Федеральный бюджет (в рамках реализации индивидуальной программы социально-экономического развития Чувашской Республики)	Предназначен для обустройства шпалер, приобретения посадочного материала, в том числе и в рамках научно-технологического сопровождения
Грант «Чувашский хмель – НИОКР»	Федеральный бюджет (в рамках реализации индивидуальной программы социально-экономического развития Чувашской Республики)	Предназначен на разработку опытных (промышленных) образцов сельхозтехники и оборудования для возделывания хмеля и обработки хмелеплантаций
Грант на развитие научно-лабораторной инфраструктуры в области хмелеводства	Региональный бюджет	Предназначен на развитие центров компетенций в области хмелеводства, развитие научно-лабораторной инфраструктуры, создание маточников, приобретение специализированной техники
Государственная премия Чувашской Республики в области науки и техники (направление АПК)	Региональный бюджет	Предназначена для поддержки научных исследований, в том числе и по приоритетным направлениям развития региона

Следует отметить, что в таблице отражены меры поддержки за счет средств бюджетов бюджетной системы Российской Федерации и не включены меры поддержки научно-технологической деятельности за счет средств бизнеса, основном гранты для научных и образовательных организаций.

Сформированная в Чувашской Республике система научно-технологического сопровождения является основой для развития отрасли. Однако для достижения технологического суверенитета и значительного наращивания производственно-экономического потенциала необходима ее постоянная эволюция. На основе выявленных в ходе исследования системных проблем и с учетом существующего задела, авторским коллективом разработаны и предлагаются к реализации следующие приоритетные направления совершенствования:

1. Создание и внедрение биотехнологического инструментария в селекционный процесс. Несмотря на успехи в классической селекции, существующие темпы создания новых конкурентоспособных сортов хмеля недостаточны для быстрого замещения импортного посадочного материала. В качестве ключевых направлений совершенствования предлагается:

- развитие лабораторной базы для молекулярно-генетического маркирования. Создание на базе Центра компетенций «Чувашия – центр производства хмеля» или Чувашского НИИСХ лаборатории, оснащенной для проведения ПЦР-анализа, генотипирования и ускоренного скрининга селекционного материала, что позволит сократить сроки селекционного цикла за счет раннего отбора растений с целевыми признаками (высокое содержание альфакислот, устойчивость к заболеваниям, адаптивность к изменению климата);

- разработка и внедрение методик микроклонального размножения (*in vitro*). Это направление решит критическую проблему дефицита оздоровленного чистосортного посадочного материала. Биотехнологическое размножение позволит быстро тиражировать новые перспективные сорта отечественной селекции, исключая риски передачи вирусных и других системных инфекций.

2. Разработка и реализация комплексной системы глубокой переработки хмеля. Для преодоления зависимости от импорта хмелевых экстрактов и продуктов с высокой добавленной стоимостью необходимо создать полный технологический цикл внутри страны, для этого предлагается:

- научно-технологический проект по разработке отечественных технологий экстракции. В кооперации с химико-технологическими вузами и институтами РАН (например, ИОХ им. Н.Д. Зелинского) необходимо адаптировать и оптимизировать методы сверхкритической CO_2 -экстракции и экстракции жидкими растворителями для различных сортов чувашского хмеля. Цель – получение стандартизированных, стабильных по составу экстрактов, востребованных крупными пивоваренными компаниями;

- создание опытно-промышленной установки глубокой переработки. На следующем этапе, на основе успешных лабораторных

исследований, необходимо реализовать инвестиционный проект по созданию пилотной или опытно-промышленной линии, что станет основой для формирования нового сегмента перерабатывающей промышленности в регионе и позволит утилизировать менее кондиционное сырье, повышая общую рентабельность отрасли.

3. Цифровизация агротехнологических процессов и формирование системы «цифрового хмелевода». Для преодоления проблемы дефицита квалифицированных кадров и повышения эффективности управления агротехнологиями предлагается:

- разработка и внедрение отечественной цифровой платформы для точного хмелеводства. Платформа должна интегрировать данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), сенсоров на полях (влажность, температура почвы), метеоданных и агрохимического мониторинга. На основе этих данных с применением методов искусственного интеллекта система будет формировать рекомендации по дифференцированному поливу, внесению удобрений и средств защиты растений;

- создание цифровых симуляторов и курсов для системы непрерывного образования. Для подготовки кадров предлагается разработать виртуальные тренажеры для управления хмелеуборочной техникой, симуляторы процессов сушки и первичной переработки. Это повысит качество практической подготовки специалистов без риска порчи дорогостоящего оборудования и сырья.

4. Усиление кооперационной модели и коммерциализации разработок. Для преодоления разрыва между научной идеей и ее промышленным внедрением необходимо:

- формирование консорциумов по принципу «наука – бизнес – образование». Инициировать создание целевых консорциумов для реализации конкретных НИОКР (например, по разработке новой линейки машин или биоактивных добавок из хмеля). Взаимодействие должно строиться на четком разделении рисков и результатов интеллектуальной деятельности;

- расширение инструментов проектного финансирования. Помимо существующих грантов, активнее привлекать средства промышленных партнеров и внедрять механизмы софинансирования НИОКР в рамках государственно-частного партнерства. Особое внимание – поддержке стартапов и малых инновационных предприятий, создаваемых при вузах и научных центрах.

Предложенные направления носят комплексный и взаимодополняющий характер. Их реализация позволит не только устранить текущие «узкие места», но и вывести региональную систему научно-технологического сопровождения на качественно новый уровень – с акцентом на опережающее развитие и создание прорывных компетенций. Это превратит Чувашскую Республику из лидера по производству сырья в ведущий российский центр компетенций по полному циклу создания технологий для хмелеводства, что соответствует целям национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности» и стратегии научно-технологического развития РФ.

Выводы. В Чувашской Республике сформирована и реализуется система научно-технологического сопровождения развития производственно-экономического потенциала хмелеводства в регионе. Система охватывает поддержкой все технологические процессы возделывания и переработки хмеля, также обеспечивает отрасль кадрами, реализацию прикладных научных проектов в области селекции и технологий, машиностроении, повышает эффективность и усиливает интенсификацию отрасли. Отличительной особенностью региона является наличие мер поддержки организаций и физических лиц, вовлеченных в реализацию мероприятий по научно-технологическому развитию отрасли. В качестве перспективных направлений развития системы сопровождения хмелеводства можно выделить аналитическое сопровождение внедрения биотехнологий в отрасль, а также разработку и внедрение современных технологий глубокой переработки хмеля экстрагированием. С учетом вовлечения в хмелеводство других регионов страны, следует отметить возможности масштабирования опыта региона на другие субъекты страны.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-20500, https://rscf.ru/project/24-28-20500//

Литература

1. Афанасьева О.Г., Иванов Е.А., Макушев А.Е. Исследование мировой торговли хмелем и определение места России в товарообороте продукции // Аграрный вестник Урала. Специальный выпуск «Экономика». 2022. С.2-17. doi: 10.32417/1997-4868-2022-228-13-2-17.

2. Как пивовары замещают импортный хмель российским [Электронный ресурс] // РБК Вино. 2024. URL: https://www.rbc.ru/wine/news/66dafef79a7947bc500eda51?ysclid=m2iimz6dg868247909 (Дата доступа: 09.10.2025).

3. Инженерно-технологические резервы интенсификации возделывания хмеля в Чувашской Республике: монография / Н. Н. Пушкаренко, П. А. Смирнов, А. В. Коротков [и др.]. – Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2018. – 356 с.

4. Макушев А. Е., Владимиров В.В., Захаров А.И. Возможности развития хмелеводства в Чувашской Республике // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 11. № 4 (42). С.15-19 doi: 10.12737/article_592fc836294053.42428388.

5. Šrédl K. et al. Hop production in the Czech Republic and its international aspects // Heliyon. 2020. Vol. 6, No. 7. P. e04371. doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04371.

6. Materna K. et al. How microbreweries flooded Europe: mapping a new phenomenon in the beer industry // Journal of Maps. 2022. Vol. 18, No. 1. P. 18–25. doi: https://doi.org/10.1080/17445647.2021.2012536.

7. Коротков А.В., Короткова З.П., Пушкаренко Н.Н. Интродукция зарубежных сортов хмеля в условиях юго-восточной части Волго-Вятской зоны // Вестник Чувашского государственного аграрного

8. Mozny M. et al. Climate-induced decline in the quality and quantity of European hops calls for immediate adaptation measures // Nat. Commun. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 6028. dio: https://doi.org/10.1038/s41467-023-41474-5.

9. Дмитриев Ю. П., Медведев В. И., Акимов А. П. [и др.] Машинные технологии для возделывания хмеля / // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. Т. 13. № 2 (49). С.86–92. doi: 10.12737/article_5b3506e7938e47.51294573.

10. Иванов Е. А., Малинина Л. Ю., Пушкаренко Н. Н. Учетное обеспечение обоснования затрат хмелеводства при его государственном субсидировании (на примере Чувашской Республики) // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 4 (64). С. 96–104. doi: 10.12737/2073-0462-2022- 96-104.

11. Хмелеводство в Чувашии продолжает комплексно развиваться [Электронный ресурс] // ФГБУ «Центр Агроаналитики». 2024. URL: https://specagro.ru/news/202306/kompleksnyy-podkhod-k-razvitiyu-khmelevodstva-v-chuvashskoy-respublike-pozvolyaet (дата доступа: 01.10.2025).

Сведения об авторах:

Толстова Мария Леонидовна – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой финансового права, e-mail: maryaleon@yandex.ru

Корнилова Александра Евгеньевна – старший преподаватель кафедры гражданско-правовых дисциплин, e-mail: kornilova_aleksandra@bk.ru

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION AND ECONOMIC POTENTIAL OF HOP GROWING IN THE CHUVASH REPUBLIC

M. L. Tolstova, A. E. Kornilova

Abstract. Hop growing in the Russian Federation is a sector of agro-industrial complex that is largely dependent on imported technological solutions and products, the lack of domestic production of these products creates significant barriers to the intensification of domestic hop production and processing. The Chuvash Republic is the country's primary hop-producing region for bitter-aromatic varieties, necessitating the implementation of systematic measures to provide scientific and technological support for the development of hop production and economic potential. Based on a study of the current regional model of scientific and technological support for hop cultivation, the authors identified key areas of focus – from the concept of implementing continuous agricultural education and research to the breeding of new hop varieties and development of promising specialized machinery and mechanisms. In the Chuvash Republic, effective cooperation has been established between the participants in the support system, represented by both federal and regional institutions. The region is actively developing new competencies related to scientific and technological support for investment projects in hop cultivation, and this area is specifically highlighted in the state program for scientific and technological development of the region. The analysis of existing measures to support scientific and technological support for hop cultivation in Chuvashiya demonstrates their adequacy and comprehensiveness at the current stage, as well as the potential for adjustment in light of changing priorities. Authors identify the introduction of biotechnological tools in hop breeding, as well as the development and implementation of a promising system for advanced hop processing, as priority areas for increasing the effectiveness of scientific and technological support for the development of the production and economic potential of hop growing.

Key words: hop growing, scientific and technological support, intensification, production and economic potential, government support, technological sovereignty.

References

1. Afanaseva OG, Ivanov EA, Makushev AE. [Study of the world hop trade and determination of Russia's place in the commodity turnover]. Agrarnyy vestnik Urala. Spetsialnyy vypusk "Ekonomika". 2022; 2-17 p. doi: 10.32417/1997-4868-2022-228-13-2-17.

2. How brewers are replacing imported hops with Russian ones? [Internet]. RBC Wine. 2024; [cited 2025, October 09]. Available from: https://www.rbc.ru/wine/news/66dafef79a7947bc500eda51?ysclid=m2iimz6dg868247909.

3. Pushkarenko NN, Smirnov PA, Korotkov AV. Inzhenerno-tekhnologicheskie rezervy intensifikatsii vozdelyvaniya khmelya v Chuvashskoy Respublike: monografiya. [Engineering and technological reserves for the intensification of hop cultivation in the Chuvash Republic: monograph]. Cheboksary: Chuvashskaya GSKhA. 2018; 356 p.

4. Makushev AE, Vladimirov VV, Zakharov AI. [Possibilities for the development of hop growing in the Chuvash Republic]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017; Vol.11. 4 (42). 15-19 p. doi: 10.12737/article_592fc836294053.42428388.

5. Sredl K. Hop production in the Czech Republic and its international aspects. Heliyon. 2020; Vol.6. No.7. e04371 p. doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04371.

6. Materna K. How microbreweries flooded Europe: mapping a new phenomenon in the beer industry. Journal of Maps. 2022; Vol.18. No.1. 18-25 p. doi: https://doi.org/10.1080/17445647.2021.2012536.

7. Korotkov AV, Korotkova ZP, Pushkarenko NN. [Introduction of foreign hop varieties in the southeastern part of Volga-Vyatka zone]. Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; 1 (24). 9-14 p. doi: 10.48612/vch/zu44-xe3r-2a36.

8. Mozny M. Climate-induced decline in the quality and quantity of European hops calls for immediate adaptation measures. Nat. Commun. 2023; Vol.14. No.1. 6028 p. dio: https://doi.org/10.1038/s41467-023-41474-5.

9. Dmitriev YuP, Medvedev VI, Akimov AP. [Machine technologies for hop cultivation]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018; Vol.13. 2 (49). 86-92 p. doi: 10.12737/article_5b3506e7938e47.51294573.

10. Ivanov EA, Malinina LYu, Pushkarenko NN. [Accounting support for justifying the costs of hop growing with its state subsidies (on the example of the Chuvash Republic)]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 4 (64). 96-104 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022- 96-104.

11. Hop growing in Chuvashia continues to develop comprehensively. [Internet]. Federal State Budgetary Institution "Center for Agroanalytics". 2024; [cited 2025, October 01]. Available from: https://specagro.ru/news/202306/kompleksnyy-podkhod-k-razvitiyu-khmelevodstva-v-chuvashskoy-respublike-pozvolyaet.

Authors:

Tolstova Mariya Leonidovna – Ph.D of Economic Sciences, Associate Professor, Head of Financial Law Department, e-mail: maryaleon@yandex.ru

Kornilova Aleksandra Evgenevna – senior lecturer of Civil Law Disciplines Department, e-mail: kornilova_aleksandra@bk.ru

Chuvash State University named after I.N.Ulyanov, Cheboksary, Russia.

К сведению авторов

Предоставляемые к публикации статьи, должны содержать результаты научных исследований в области экономики агропромышленного комплекса, механизации и технического сервиса, агрономии. Статьи проходят отбор на критерий актуальности и новизны рассматриваемых научных проблем.

Предполагается проверка предоставленного авторами материала в системе «Антиплагиат». Рекомендуемый объем статьи, включая приложения, должен составлять не менее 9 и не более 14 страниц. Статьи должны быть оформлены на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, размер – 14 пт, межстрочный интервал – 1,0. Поля (обычные) сверху и снизу – 2 см, слева – 3 см справа – 1,5 см, абзац (отступ) – 0,5 см (не задавать пробелами), формат – книжный.

Если статья была или будет отправлена в другое издание необходимо сообщить об этом редакции.

Оформление статьи.

1. Слева в верхнем углу без абзаца печатается УДК статьи (проверяйте корректность выбранного УДК на сайте Всероссийского Института Научной и Технической Информации – ВИНиТИ).

2. Ниже, по-центру строки название статьи (название статьи должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким) жирным шрифтом заглавными буквами.

3. Затем жирными строчными буквами –инициалы и фамилия автора (ов). Пропускается одна строка.

4. После этого через пробел – реферат статьи (рекомендуемый объем – 200–250 слов) отражает тематику статьи, ценность, новизну, основные положения и выводы исследований с использованием цифровых данных. Запрещается разбивка реферата на абзацы, использование вводных слов и оборотов. Реферат может публиковаться самостоятельно и, следовательно, должна быть понятной без обращения к тексту статьи. По реферату публикации читатель должен иметь возможность определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

5. С нового абзаца – ключевые слова (не более 9 слов).

Слева строчными буквами печатается «Ключевые слова:» (без кавычек) и через запятую приводятся ключевые слова или словосочетания. Пропускается одна строка.

6. При написании научной статьи необходимо придерживаться следующей структуры изложения: «Введение», «Условия, материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».

7. В случае если ваша статья подготовлена при выполнении гранта и есть необходимость прописать данный источник, добавляем после выводов раздел, «**Сведения о финансировании». К примеру – Сведения о финансировании:** Работа выполнена по государственному заданию НИОКТР № 0477–2019–0005 при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

В разделе «Введение» предлагается постановка проблемы, должна быть сформулирована и обоснована цель работы и, если необходимо, рассмотрена ее связь с важными научными и практическими направлениями, дается теоретическое обоснование исследования. Должны присутствовать ссылки на публикации последних лет, в данной области включая зарубежных авторов.

В следующем разделе раскрываются особенности данного исследования, приводятся условия, материалы и методы исследований. Место исследования уточняется до области (края). Следует отразить время, место, методику и условия проведения опытов.

Главный раздел статьи посвящается представлению, анализу и обсуждению результатов. Полученные результаты должны быть освещены с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными.

В завершении представляются выводы и рекомендации.

Подзаголовки и заголовки набираются жирным шрифтом с заглавной буквы. Нумерация ссылок на библиографический список в тексте располагается в порядке упоминания источников. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках, например: [1].

8. После основного текста статьи пропускается одна строка и по центру печатается заглавие «Литература» (без кавычек). Через одну строку помещается пронумерованный перечень источников в порядке ссылок по тексту. Список литературы (не менее **десяти** источников, в том числе не менее **трех** зарубежных) оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008 и требованиями журнала, тщательно проверяется авторами и приводится в конце статьи. Нумерация ссылок в списке приводится в соответствии с порядком их упоминания в тексте. В одном пункте перечня следует указывать только один источник информации. Злоупотребление самоцитированием не допускается. Доля ссылок на собственные публикации авторов должна составлять не более 25% списка литературы. Цитирование работ какого-либо одного автора, не входящего в состав авторского коллектива рукописи, также не должно превышать 25%. Рекомендуется ссылаться не более чем на 2 публикации каждого из авторов. Доля ссылок на источники старше 10 лет не должна превышать 30% списка литературы, доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ за последние 8 лет должна составлять не менее 50% списка литературы. Ссылки на учебники, учебные пособия, авторефераты диссертаций не принимаются. Также не принимаются ссылки на материалы конференций старше 2 лет. Число источников в «сериальных» ссылках должно быть не более трех.

Все источники должны иметь ссылку в тексте статьи.

9. «Сведения об авторах» Ф.И.О. (полностью), ученая степень, учёное звание, должность, указать кафедру или отдел, адрес для связи, e-mail и полное наименование организации.

Пропускается одна строка.

10. На английском языке печатается по центру печатается название статьи.

Так же на английском языке слева печатается реферат, затем ключевые слова.

11. Приводится библиографический список на латинице (путем транслитерации) под заголовком References. (Переводить только названия статей, остальное – в латинской транслитерации)

12. «Authors:» – информация на английском языке.

Иллюстрации к статье (при наличии) в формате JPEG, PNG, TIF должны быть четко выполненными, хорошего качества, наглядно иллюстрирующими текст. В тексте статьи обязательно должны быть ссылки на представленные рисунки. Нумерация рисунков производится в порядке ссылок по тексту. Нумерационный заголовок набирается выравниванием по центру. Тематический заголовок в той же строке, сразу после нумерационного (например: Рис. 1 –. Ссылка на рисунок в основном тексте оформляется в скобках: (рис. 1), если а тексте только один рисунок, то не нумеруется.

Таблицы представляются в редакторе WORD. Нумерация таблиц производится в порядке ссылок по тексту. В тексте статьи обязательно должны быть указаны ссылки на все представленные таблицы. Нумерационный заголовок набирается с выравниванием по центру (например: Таблица 1. …). Ссылка на таблицу в основном тексте оформляется в скобках, например: (табл. 1), если в тексте только одна таблица, то не нумеруется.

Простые **формулы**, не содержащие специальных символов (отсутствующих на клавиатуре), должны быть набраны символами с клавиатуры без использования специальных редакторов. Формулы, содержащие специальные символы (отсутствующие на клавиатуре), а также сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул Microsoft Equation 2.0, 3.0 или MathType equation. Не допускается набор части формулы символами, а части – в редакторе формул. Не рекомендуется вставлять в текст формулы в виде рисунков. Ссылка на формулы в основном тексте оформляется в скобках, например: (1). В тексте обязательно должны быть указаны ссылки на все представленные формулы. Если в тексте статьи формулы нумеруются, то эту нумерацию следует выполнить ручным набором чисел. Автоматическая нумерация не допускается.

Авторы предоставляют в редакцию (одновременно):

– электронная версия статьи (по электронной почте: vestnik@kazgau.com) (шаблон ниже). Файл со статьей следует называть по фамилии первого автора (Иванов И.И. – Определение силы);

– сведения об авторах (в электронном виде): Ф.И.О. (полностью), ученая степень, учёное звание, должность, указать кафедру или отдел, адрес для связи, телефон, e-mail и полное наименование организации, эти же сведения на английском языке.

Звездочкой отмечается фамилия автора, с которым необходимо вести переписку;

– сопроводительное письмо на имя главного редактора журнала на бланке направляющей организации с заключением об актуальности работы и рекомендациями к опубликованию, с подписью руководителя учреждения.

– аспиранты предоставляют справку подтверждающую место учебы.

Поступившие и принятые к публикации статьи не возвращаются.

При условии выполнения формальных требований к материалам на публикацию, предоставленная автором рукопись статьи рецензируется, согласно установленного порядка рецензирования рукописей, поступающих в редакцию журнала. Решение о целесообразности публикации после рецензирования принимается главным редактором (заместителями главного редактора), а при необходимости – редколлегией в целом.

Редакция оставляет за собой право не регистрировать статьи, не отвечающие настоящим требованиям, а также право на воспроизведение материалов (опубликование, тиражирование) без ограничения тиража. Рукописи статей подвергаются редакционной обработке. Редакция оставляет за собой право вносить изменения, имеющие редакционный характер и не затрагивающие содержания статьи. Все статьи проходят институт рецензирования (экспертной оценки), по результатам которого редакционная коллегия принимает окончательное решение о целесообразности опубликования. За содержание статей юридическую и иную ответственность несут авторы. Статьи, направленные в редакцию без выполнения основных требований к публикуемым статьям, не рассматриваются. В случае отклонения статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

Публикация статей в журнале платная, авторы статьи оплачивают по стандартной тарификации.

Статьи отправлять на электронный адрес: vestnik@kazgau.com

For Authors

Articles submitted for publication must contain the results of scientific research in the field of economics of the agro-industrial complex, mechanization and technical service, agronomy. Articles are selected for the criterion of relevance and novelty of the scientific problems under consideration.

It is supposed to check the material provided by the authors in the "Antiplagiat" system. The recommended length of an article, including annexes, should be at least 9 and no more than 14 pages. Articles should be formatted on A4 sheets, font - Times New Roman, size - 14 pt, line spacing - 1.0. Margins (usual) above and below - 2 cm, on the left - 3 cm on the right - 1.5 cm, paragraph (indentation) - 0.5 cm (do not use spaces), format - book.

If the article was or will be sent to another publication, it is necessary to notify the editorial office about it.

Article design.

1. In the upper left corner, without a paragraph, the UDC of the article is printed (check the correctness of the selected UDC on the website of the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information - VINiTI).

2. Below, in the center of the line, the title of the article (the title of the article should reflect the main idea of the research, be as short as possible) in bold capital letters.

3. Then, in bold lowercase letters, the initials and surname of the author (s). One line is skipped.

4. After that, through a gap - the abstract of the article (the recommended volume is 200–250 words) reflects the topic of the article, value, novelty, main provisions and conclusions of research using digital data. It is forbidden to break the abstract into paragraphs, the use of introductory words and phrases. The abstract can be published independently and, therefore, should be understandable without referring to the text of the article. According to the abstract of the publication, the reader should be able to determine whether it is worth referring to the full text of the article to obtain more detailed information of interest to him.

5. From a new paragraph - keywords (no more than 9 words).

On the left, “Keywords:” is printed in lowercase letters (without quotes) and keywords or phrases are separated by commas. One line is skipped.

6. When writing a scientific article, it is necessary to adhere to the following structure of presentation: "Introduction", "Conditions, materials and methods", "Results and discussion", "Conclusions".

7. If your article was prepared during the implementation of the grant and there is a need to register this source, add the section "Information about the source of funding" after the conclusions. For example - Information about the source of funding: The work was carried out according to the state order of R&D

No. 0477–2019–0005 with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

In the "Introduction" section, a statement of the problem is proposed, the purpose of the work should be formulated and substantiated, and, if necessary, its connection with important scientific and practical areas should be considered, and a theoretical basis for the study is given. There should be links to publications of recent years, in this area, including foreign authors.

In the next section, the features of this research are revealed, conditions, materials and research methods are given. The place of research is specified to the area (edge). The time, place, methodology and conditions of the experiments should be reflected.

The main section of the article is devoted to the presentation, analysis and discussion of the results. The results obtained should be highlighted from the point of view of their scientific novelty and compared with the corresponding known data.

Finally, conclusions and recommendations are presented.

Subheadings and headings are capitalized in bold type. The numbering of references to the bibliographic list in the text is arranged in the order in which the sources are mentioned. Literature references in the text are given in square brackets, for example: [1].

8. After the main text of the article, one line is skipped and the title "Literature" is printed in the center (without quotes). A numbered list of sources in the order of links in the text is placed in one line. The list of literature (at least ten sources, including at least three foreign) is drawn up in accordance with GOST R 7.0.5-2008 and the requirements of the journal, carefully checked by the authors and given at the end of the article. References are numbered in the list in accordance with the order in which they appear in the text. Only one source of information should be indicated in one item on the list. Abuse of self-citation is not allowed. The share of references to the authors' own publications should be no more than 25% of the list of references. Citation of the works of any one author who is not part of the author's collective of the manuscript should also not exceed 25%. It is recommended to refer to no more than 2 publications of each of the authors. The share of references to sources older than 10 years should not exceed 30% of the list of references, the share of references to publications in journals from the RSCI core over the past 8 years should be at least 50% of the list of references. Links to textbooks, teaching aids, dissertation abstracts are not accepted. Also, links to materials are not accepted. conferences over 2 years old. The number of sources in "serial" links should be no more than three.

All sources must have a link in the text of the article.

9. "Information about the authors" (in full), academic degree, academic title, position, indicate the department or department, contact address, e-mail and full name of the organization

One line is skipped.

10. In English, the title of the article is printed in the center.

The abstract is also printed in English on the left, then the keywords.

11. There is a bibliographic list in Latin (by transliteration) under the heading References. (Translate only the titles of articles, the rest - in Latin transliteration)

12. "Authors:" - information in English.

Illustrations for the article (if any) in JPEG, PNG, TIF format must be clearly executed, of good quality, clearly illustrating the text. The text of the article must contain links to the presented figures. Figures are numbered in the order of references in the text. The numbered heading is set by center alignment. Thematic heading in the same line, immediately after the numbering (for example: Fig. 1 -. The link to the figure in the main text is made out in brackets: (Fig. 1), if there is only one figure in the text, then it is not numbered.

Tables are presented in a WORD editor. Tables are numbered in the order of links in the text. The text of the article must contain references to all the tables presented. The numbered heading is set with center alignment (for example: Table 1.…). The link to the table in the main text is made in brackets, for example: (Table 1), if there is only one table in the text, then it is not numbered.

Simple formulas that do not contain special characters (absent on the keyboard) must be typed in characters from the keyboard without using special editors. Formulas containing special characters (absent on the keyboard), as well as complex and multi-line formulas must be typed entirely in the Microsoft Equation 2.0, 3.0 or Math-Type equation editor. It is not allowed to type a part of a formula with symbols, and a part in the formula editor. It is not recommended to insert formulas in the form of pictures into the text. References to formulas in the main text are made in brackets, for example: (1). The text must contain references to all presented formulas. If formulas are numbered in the text of the article, then this numbering should be performed by manually dialing numbers. Automatic numbering is not allowed.

The authors submit to the editor (at the same time):

- an electronic version of the article (by e-mail: vestnik@kazgau.com) (template below). The file with the article should be named by the name of the first author (Ivanov I.I. - Determination of force);
- information about the authors (in electronic form): full name (in full), academic degree, academic rank, position, indicate the department or department, contact address, telephone, e-mail and full name of the organization, the same information in English.

The asterisk marks the surname of the author with whom it is necessary to carry out the census

- a cover letter addressed to the editor-in-chief of the journal on the letterhead of the sending organization with a conclusion on the relevance of the work and recommendations for publication, signed by the head of the institution.
- graduate students provide a certificate confirming the place of study.

Articles received and accepted for publication will not be returned.

Subject to the fulfillment of the formal requirements for the materials for publication, the manuscript of the article provided by the author is reviewed in accordance with the established procedure for reviewing manuscripts submitted to the editorial office of the journal. The decision on the expediency of publication after reviewing is made by the editor-in-chief (deputy editor-in-chief), and, if necessary, by the editorial board as a whole.

The editors reserve the right not to register articles that do not meet these requirements, as well as the right to reproduce materials (publication, duplication) without limiting the circulation. Manuscripts of articles are subject to editorial processing. The editors reserve the right to make changes that are editorial in nature and do not affect the content of the article. All articles go through the institute of peer review (peer review), as a result of which the editorial board makes the final decision on the appropriateness of the publication. The authors are legally and otherwise responsible for the content of the articles. Articles sent to the editorial office without fulfilling the basic requirements for published articles are not considered. In case of rejection of the article, the editorial board sends a reasoned refusal to the author.

The publication of articles in the journal for a charge, the authors of the article pay according to the standard tariffication.

Articles should be sent to the email address: vestnik@kazgau.com

Ежеквартальный научный журнал

Вестник Казанского ГАУ

№ 4 (80), декабрь 2025 г.

Редактор – Михайлова Л.В.
Технический редактор – Шумков Т.А.
Коррекция переводов – Галлямова Н.Р.
Корректор – Барсукова Р.С.

ISSN 2073-0462

Формат 60x84/8. Тираж 500. Дата выхода в свет: 29.12.2025
Печать офсетная. Усл. п. л. 21 Заказ 38. Цена свободная.
Издательство Казанского ГАУ / 420015 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65.
Лицензия на издательскую деятельность код 221 ИД № 06342 от 28.11.2001.
Отпечатано в типографии Казанского ГАУ.
420015 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65.
Казанский государственный аграрный университет