



Инновации в АПК: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ



№2 (50) 2026

Инновации в АПК: проблемы и перспективы

Теоретический и научно-
практический журнал

Выпуск 2 (50)
2026 г.

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Белгородский
государственный аграрный университет
имени В.Я. Горина»

Издаётся с 2013 года

Выходит один раз в квартал

Официальный сайт: <https://belgau.ru>

В журнале публикуются результаты
фундаментальных и прикладных
исследований, обсуждаются теоретические,
методологические и прикладные проблемы
агропромышленного комплекса России и
зарубежья, предлагаются пути их решения.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ
№ ФС 77-63038 от 10 сентября 2015 г.
выдано Федеральной службой по надзору в
сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

ISSN – 2311–9535

Подписной индекс в каталоге
«Объединенный каталог. Пресса России.
Газеты и журналы» – 40760.

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ).
Материалы издания выборочно включаются
в реферативную базу данных Agris.

Дизайн-макет и компьютерная вёрстка:
Манохин А.А., Воробьёва Т.Ю.

Адрес редакции и издателя журнала:
308503, ул. Вавилова, 1, п. Майский,
Белгородский р-н, Белгородская обл., Россия
Тел.: +7-4722-39-11-69,
Факс: +7-4722-39-22-62

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Белгородский
государственный аграрный университет
имени В.Я. Горина», 2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – Алейник С.Н., к.т.н., доцент;

Заместитель главного редактора – Пархомов Е.А., к.э.н.

Члены редакционной коллегии:

Азаров В.Б., д.с.-х.н., профессор;
Акинчин А.В., к.с.-х.н., доцент;
Алдошин Н.В., д.т.н., профессор;
Аничин В.Л., д.э.н., профессор;
Артемова О.Ю., к.с.-х.н.;
Афоничев Д.Н., д.т.н., профессор;
Бахарев Д.Н., д.т.н., доцент;
Ваганова О.В., д.э.н., профессор;
Гончаренко О.В., к.э.н., доцент;
Демешева И.А., к.э.н., доцент;
Запорожцева Л.А., д.э.н., профессор;
Китаев Ю.А., д.э.н., доцент;
Котлярова Е.Г., д.с.-х.н., профессор;
Коцарева Н.В., д.с.-х.н., доцент;
Купренко А.И., д.т.н., профессор;
Лебедев А.Т., д.т.н., профессор;

Ломазов В.А., д.физ.-мат.н., профессор;
Медяева З.П., д.э.н., профессор;
Морозова Т.С., к.с.-х.н., доцент;
Моторин В.А., д.т.н., доцент;
Муравьев А.А., к.с.-х.н., доцент;
Мязин Н.Г., д.с.-х.н., профессор;
Наседкина Т.И., д.э.н., доцент;
Пастухов А.Г., д.т.н., профессор;
Саенко Ю.В., д.т.н., доцент;
Сидоренко О.В., д.э.н., доцент;
Смуров С.И., к.с.-х.н.;
Ступаков А.Г., д.с.-х.н., профессор;
Тимашов Е.П., д.т.н., доцент;
Токарь Е.В., д.э.н., профессор;
Юдаев И.В., д.т.н., доцент.

НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель – Алейник С.Н., к.т.н., доцент;

Зам. председателя – Пархомов Е.А., к.э.н.

Члены научно-редакционного совета:

Бондаренко Л.В., д.э.н., профессор, член-корреспондент РАН;
Дорохов А.С., д.т.н., профессор, академик РАН;
Ерохин М.Н., д.т.н., профессор, академик РАН;
Колесников А.В., д.э.н., доцент, член-корреспондент РАН;
Леммер А.Дж., д.с.-х.н. (Германия);
Простенко А.Н., к.э.н., доцент;
Савченко Е.С., д.э.н., профессор, член-корреспондент РАН;
Турусов В.И., д.с.-х.н., профессор, академик РАН;
Ушачев И.Г., д.э.н., профессор, академик РАН.

В Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на
соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, включены следую-
щие научные специальности, представленные в журнале:

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные
науки)

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сель-
скохозяйственные науки)

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

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение аг-
ропромышленного комплекса (технические науки)

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

5.2.4. Финансы (экономические науки)

Информация об ответственных редакторах и секретарях тематических
секций указана в конце журнала в разделе «Руководство для авторов».

Отпечатано в ООО Издательско-полиграфический центр «ПОЛИТЕРРА»

Подписано в печать 30.06.2026 г., дата выхода в свет 15.07.2026 г.

Усл. п.л. 13,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 2135. Свободная цена.

Адрес типографии: г. Белгород, ул. Студенческая 16, офис 19.

Тел. +7 910 360-14-99

e-mail: polyterra@mail.ru, официальный сайт: <http://www.polyterra.ru>

Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives

Theoretical, research and practice
journal

**Release 2 (50)
2026**

Founder:

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education «Belgorod State
Agricultural University named after V. Gorin»

Published since 2013

Issued once per quarter

Official website: <https://belgau.ru>

The journal publishes the results of fundamental
and applied research, discusses the theoretical,
methodological and applied problems of the
agro-industrial complex of Russia and abroad,
suggests ways to solve them.

Registration Certificate: ПИ № ФС 77-63038
of 10 September 2015 issued by the Federal
service for supervision in the sphere of
Telecom, information technologies and mass
communication (Roscomnadzor)

ISSN – 2311–9535

Subscription Index in the directory «The United
catalogue. The Russian Press.
Newspapers and magazines» – 40760.

The journal is included in the Russian Index of
Scientific Citing (RISC).
Scientific papers are selectively included in
Agris abstract database.

Design layout and computer-aided makeup:
Manokhin A.A., Vorobyeva T.Yu.

Editorial board and journal publisher:
ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy,
Belgorod region, Russia
Tel.: +7 4722 39-11-69,
Fax: +7 4722 39-22-62

EDITORIAL STAFF

Editor in Chief – Aleinik S.N., Cand.Tech. Sci, as. professor;

Deputy editor – Parkhomov E.A., Cand. Econ. Sci.

Members of Editorial Staff:

Azarov V.B. , Dr. Agr. Sci., prof.;	Lomazov V.A. , Dr. Phys.-math. Sci., prof.;
Akinchin A.V. , Cand. Agr. Sci., as. prof.;	Medelyaeva Z.P. , Dr. Econ. Sci., prof.;
Aldoshin N.V. , Dr. Tech. Sci., prof.;	Morozova T.S. , Cand. Agr. Sci., as. prof.;
Anichin V.L. , Dr. Econ. Sci., prof.;	Motorin V.A. , Dr. Tech. Sci., as. prof.;
Artemova O.Yu. , Cand. Agr. Sci.;	Muravyov A.A. , Cand. Agr. Sci., as. prof.;
Afonichev D.N. , Dr. Tech. Sci., prof.;	Myazin N.G. , Dr. Agr. Sci., prof.;
Bakharev D.N. , Dr. Tech. Sci., as. prof.;	Nasedkina T.I. , Dr. Econ. Sci., as. prof.;
Vaganova O.V. , Dr. Econ. Sci., prof.;	Pastukhov A.G. , Dr. Tech. Sci., prof.;
Goncharenko O.V. , Cand. Econ. Sci., as. prof.;	Saenko Yu.V. , Dr. Tech. Sci., as. prof.;
Demesheva I.A. , Cand. Econ. Sci., as. prof.;	Sidorenko O.V. , Dr. Econ. Sci., as. prof.;
Zaporozhtseva L.A. , Dr. Econ. Sci., prof.;	Smurov S.I. , Cand. Agr. Sci.;
Kitaev Yu.A. , Dr. Econ. Sci., as. prof.;	Stupakov A.G. , Dr. Agr. Sci., prof.;
Kotliarova E.G. , Dr. Agr. Sci., prof.;	Timashov E.P. , Dr. Tech. Sci., as. prof.;
Kotsareva N.V. , Dr. Agr. Sci., as. prof.;	Tokar E.V. , Dr. Econ. Sci., prof.;
Kupreenko A.I. , Dr. Tech. Sci., prof.;	Yudaev I.V. , Dr. Tech. Sci., as. prof.
Lebedev A.T. , Dr. Tech. Sci., prof.;	

EDITORIAL BOARD

Chairman – Aleinik S.N., Cand. Tech. Sci, as. professor;

Vice-Chairman – Parkhomov E.A., Cand. Econ. Sci.

Members of Editorial Board:

Bondarenko L.V., Dr. Econ. Sci., professor, Correspondent Member of the RAS;
Dorokhov A.S., Dr. Tech. Sci., professor, Academician of the RAS;
Erokhin M.N., Dr. Tech. Sci., professor, Academician of the RAS;
Kolesnikov A.V., Dr. Econ. Sci., associate professor, Correspondent Member
of the RAS;
Lemmer A.J., Dr. Agr. Sci. (Germany);
Prostenko A.N., Cand. Econ. Sci., associate professor;
Savchenko E.S., Dr. Econ. Sci., professor, Correspondent Member of the RAS;
Turusov V.I., Dr. Agr. Sci., professor, Academician of the RAS;
Ushachev I.G., Dr. Econ. Sci., professor, Academician of the RAS.

The list of leading reviewed scientific journals in which the main scientific
results of dissertations for the doctoral degrees of doctor and candidate of sci-
ence should be published includes the following scientific specialties presented
in the journal:

- 4.1.1. General agriculture and crop production (agricultural sciences)
- 4.1.3. Agrochemistry, agrosoil science, plant protection and quarantine
(agricultural sciences)
- 4.3.1. Technologies, machines and equipment for the agro-industrial complex
(technical sciences)
- 4.3.2. Electrical technologies, electrical equipment and power supply of agro-
industrial complex (technical sciences)
- 5.2.3. Regional and sectoral economics (economic sciences)
- 5.2.4. Finance (economic sciences)

Information about executive editors and secretaries of thematic sections is
given at the end of the journal in the section «Guidelines for Authors».

Printed in (Limited liability company) Publication and printing
center «POLYTERRA»

Signed for publication 30.06.2026, date of publication 15.07.2026.

Conventional printed sheet 13,6. Circulation 1000 copies.

Order № 2135. Free price.

Address of printing: st. Student 16, office 19, Belgorod, Russia
tel. +7-910-360-14-99.

e-mail: polyterra@mail.ru, official website: [www//polyterra.ru](http://polyterra.ru)

СОДЕРЖАНИЕ

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

В.И. Борозенцев, А.В. Бекетов К ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ МАНИПУЛЯТОРА ДОЕНИЯ КОРОВ ДЛЯ ПЕРЕДВИЖНЫХ ДОИЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ТИПА «УДС».....	5
С.Ф. Вольвак ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОГО КОМБИКОРМОВОГО АГРЕГАТА.....	15
А.А. Кащевский, Ю.А. Кузнецов, Н.А. Березина, И.Н. Кравченко ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ФИЛАМЕНТА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПУЛСТРУЗИИ ИЗ РЕТ-ТАРЫ.....	24
Д.А. Нормов, Е.А. Федоренко, С.В. Соловьёв, В.В. Брус, В.Л. Болотин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЯ НА ЗЕЛЕННЫЕ ОДНОКЛЕТОЧНЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ ШТАММА <i>CHLORELLA VULGARIS</i> ИФР № С-111 ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЕЙ.....	30
Ю.В. Родионов, Ю.А. Чумиков, А.И. Скоморохова, Г.В. Рыбин ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СУХИХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ВАКУУМНЫМ ОТВОДОМ ЧАСТИЦ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА ЗАДАННОЙ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ.....	38
М.И. Романченко, А.С. Новицкий ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ШИНЫ ПРИ КАЧЕНИИ КОЛЕСА В СВОБОДНОМ И ВЕДОМOM РЕЖИМАХ.....	47

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОНОМИИ

В.И. Желтухина, Е.Ю. Колесниченко, Е.Г. Котлярова, А.А. Муравьёв МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ ЦЕНОПОПУЛЯЦИИ ЛЮПИНА БЕЛОГО (ЛАТ. <i>LUPINUS ALBUS</i>) ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ В ПОЧВЕ.....	57
Э.Б. Мазлов, Б.С. Калоев, Д.К. Ханаева, Л.М. Хугаева, А.Х. Козырев ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ФЕСТУЛОЛИУМА В ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ.....	64
Я. Янь, И.В. Чичерин, Л. Чжао, Т. Си, Ч. Ан РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА РОБОТА ДЛЯ СБОРА ЧАЯ.....	70

ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯМИ АПК И СОЦИАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ СЕЛА

Я.С. Никольский СКВОЗНАЯ ЦИФРОВИЗАЦИЯ МОЛОЧНОЙ ОТРАСЛИ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕХАНИЗМ ВНЕДРЕНИЯ.....	79
Л.А. Решетняк, Н.Ю. Яковенко ПУТИ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА.....	87
Д.О. Сергеев, О.В. Закарчевский, С.Б. Карякин ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНОВОЙ МОДЕЛИ ROBOT-AS-A-SERVICE ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА.....	93
Е.С. Сорокина, Т.Г. Кузьмичева, О.А. Глазунова ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ПРИОРИТЕТНОСТИ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ.....	98
Руководство для авторов.....	104

CONTENTS

AGRICULTURAL ENGINEERING AND ENERGY EFFICIENCY

V.I. Borozentsev, A.V. Beketov

ON THE JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A COW MILKING MANIPULATOR FOR MOBILE MILKING STATIONS OF THE «UDS» TYPE.....5

S.F. Volvak

SUBSTANTIATION OF THE DESIGN OF A SMALL-SIZED COMPOUND FEED UNIT.....15

A.A. Kashchevsky, Yu.A. Kuznetsov, N.A. Berezina, I.N. Kravchenko

DETERMINATION OF THE TOXICITY OF 3D-PRINTING FILAMENT COMBUSTION PRODUCTS OBTAINED BY THE PULLSTRUSION METHOD FROM PET-CONTAINERS.....24

D.A. Normov, E.A. Fedorenko, S.V. Solovev, V.V. Brus, V.L. Bolotin

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ELECTRO-OZONATION ON GREEN UNICELLULAR MICROALGAE OF THE STRAIN CHLORELLA VULGARIS IFR № C-111 FOR AGRICULTURAL PURPOSES....30

Yu.V. Rodionov, Yu.A. Chumikov, A.I. Skomorokhova, G.V. Rybin

THEORETICAL CALCULATION OF DRY ORGANIC MATERIALS' GRINDING IN THE BALL MILL WITH A VACUUM REMOVAL OF PARTICLES TO OBTAIN A POWDER OF A GIVEN DEGREE OF GRINDING.....38

M.I. Romanchenko, A.S. Novitsky

THEORETICAL TIRE MECHANICS DURING ROLLING WHEELS IN FREE AND DRIVEN MODES.....47

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN AGRONOMY

V.I. Zheltukhina, E.Yu. Kolesnichenko, E.G. Kotlyarova, A.A. Muravyov

MORPHOMETRIC ASSESSMENT OF THE STABILITY OF DEVELOPMENT OF THE COENOPOPOPULATION OF WHITE (LUPINUS ALBUS) AT DIFFERENT LEVELS OF ORGANIC FERTILIZERS IN THE SOIL.....57

E.B. Mazloev, B.S. Kaloev, D.K. Hanaeva, L.M. Hugaeva, A.Kh. Kozyrev

FORMATION OF HIGHLY PRODUCTIVE PHYTOCENOSSES OF FESTULOLIUM IN THE FOOTHILL ZONE OF CENTRAL CISCAUCASIA.....64

Ya. Yang, I.V. Chicherin, L. Zhao, T. Xi, Ch. An

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR PATH PLANNING OF ROBOT ARM FOR PLUCKING TEA.....70

INNOVATIVE ECONOMICS, MANAGEMENT OF AGRICULTURAL ENTERPRISES AND SOCIAL DEVELOPMENT OF RURAL TERRITORIES

Ya.S. Nikolsky

END-TO-END DIGITALIZATION OF THE DAIRY INDUSTRY: THEORETICAL ASPECTS AND IMPLEMENTATION MECHANISM.....79

L.A. Reshetnyak, N.Yu. Yakovenko

WAYS TO REDUCE THE COST OF CROP PRODUCTION.....87

D.O. Sergeev, O.V. Zakarchevsky, S.B. Karyakin

CALCULATING THE COST OF THE ROBOT-AS-A-SERVICE IN AGRICULTURE.....93

E.S. Sorokina, T.G. Kuzmicheva, O.A. Glazunova

EXPERT ASSESSMENT OF INVESTMENT PRIORITIES IN AGRIBUSINESS USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS.....98

Guidelines for authors.....104

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

УДК 637.116

В.И. Борозенцев, А.В. Бекетов

К ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ МАНИПУЛЯТОРА ДОЕНИЯ КОРОВ ДЛЯ ПЕРЕДВИЖНЫХ ДОИЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ТИПА «УДС»

Аннотация. Разработка манипулятора доения коров, обеспечивающего автоматизацию заключительных операций машинного доения коров на универсальных доильных станциях типа «удс», при их беспривязной технологии содержания в летних лагерях является актуальной задачей. Цель исследования – обосновать конструктивно-режимные параметры манипулятора доения, автоматически изменяющего в зависимости от интенсивности молокоотдачи соотношение тактов, своевременное отключение от вакуума и снятия доильных стаканов с вымени животных, и тем самым исключает ошибки оператора на предмет своевременности выполнения заключительных операций доения. Разработана новая конструкция манипулятора доения, созданная на основе анализа известных технических решений и исследований морфологических и функциональных свойств вымени. Данный манипулятор доения в соответствии с разработанным авторами алгоритмом управления процессом доения обеспечивает изменение соотношения тактов, отключение доильных аппаратов от вакуума и их своевременное снятие в зависимости от интенсивности молокоотдачи в целом по вымени. Таким образом, адаптивное управление процессом доения путем изменения соотношения тактов (с увеличением такта отдыха до 50 %) обеспечивает «щадящий» режим доения как в начале, так и в конце доения. Кроме этого, своевременное отключение от вакуума и снятие доильных стаканов с сосков вымени позволяют сформировать у животных правильный стереотип машинного доения, способствующий сохранению здоровья вымени и росту их молочной продуктивности.

Ключевые слова: корова, молоко, манипулятор доения, вакуум, коллектор, доильный стакан, вымя, поплавок, геркон, интенсивность молокоотдачи.

ON THE JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A COW MILKING MANIPULATOR FOR MOBILE MILKING STATIONS OF THE «UDS» TYPE

Abstract. The development of a milking manipulator that automates the final milking operations of cows in universal milking stations like the «UDS» type, while housing them in loose stalls in summer camps, is a pressing issue. The objective of the study is to validate the design and operating parameters of a milking manipulator that automatically adjusts the milk flow rate, timely disconnection from the vacuum, and removal of milking cups from the cows' udders, thereby eliminating operator error in the timely completion of final milking operations. A new milking manipulator design has been developed, based on an analysis of existing technical solutions and research into the morphological and functional properties of the udder. This milking manipulator, in accordance with the authors' milking process control algorithm, allows for the adjustment of the milking cycle ratio, the disconnection of milking units from the vacuum, and their timely removal depending on the overall milk flow rate in the udder. Thus, adaptive milking control by varying the milking cycle ratio (increasing the rest cycle to 50 %) ensures a gentle milking regime both at the beginning and end of milking. Furthermore, timely vacuum release and removal of teat cups help develop the correct milking pattern in animals, promoting udder health and increasing milk production.

Keywords: cow, milk, milking manipulator, vacuum, collector, teat cup, udder, float, reed switch, milk flow intensity.

Введение. Одна из главных задач, стоящих в настоящее время перед молочным скотоводством, заключается в увеличении молочной продуктивности животных, на которую влияют многочисленные факторы (технологии содержания, селекция, микроклимат, кормление и др.) и в том числе немаловажное значение – применяемое доильное оборудование. Так как внедрение прогрессивного доильного оборудования позволит не только наиболее полно реализовать генетический потенциал коров, но и сохранить здоровье животных, увеличить число лактаций (продуктивное долголетие), а также получать молоко высокого качества. Из этого следует, что наиболее перспективным направлением в механизации машинного доения коров является модернизация доильного оборудования, направленного на автоматизацию управления процессом машинного доения для всех типов доильных установок, а также одно из наиболее высокотехнологичных направлений – роботизация доения коров.

Цель исследования состоит в обосновании и разработке новой конструкции манипулятора доения, обеспечивающего в зависимости от интенсивности молокоотдачи изменение соотношения тактов, отключение доильных стаканов от вакуума и снятие их с долей вымени.

Материалы и методы. Машинное доение животных – это сложный биотехнологический процесс, который по сравнению с другими технологическими процессами в молочном животноводстве объединяет живой организм и работу техники, то есть доильный аппарат непосредственно взаимодействует с выменем животного. То есть происходит жесткий контакт рабочего органа с выменем, и от неправильного его воздействия может вызывать у животных дискомфорт, и как следствие травмирование внутренних тканей молочных желез. Поэтому технологические характеристики (разряжение под соском, частота пульсаций и соотношение тактов) применяемого доильного оборудования должны быть наиболее приближены к физиологическим процессам, проходящим в вымени животных при их доении.

Доильное оборудование должно адекватно реагировать на изменения в интенсивности молокоотдачи и особенно при окончании доения, так как при машинном доении коров извлечение молока из соска вымени происходит за счет разряжения под ним.

© Борозенцев В. И., Бекетов А. В., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Из этого следует, что основным параметром доильного аппарата является величина разрежения, которое оказывает механическое воздействие на кровеносную систему сосков вымени. Под термином «холостое» доение понимается действие вакуума в процессе машинного доения на незаполненные молоком соски вымени коров. Такое воздействие наблюдается как правило в начале доения и при завершении доения. Причиной «холостого» доения в начале машинного доения является недостаточность подготовки коровы к доению, приводящая к доению полупустого соска, вследствие недостаточного поступления молока из цистерны вымени в цистерну соска. Основной причиной «холостого» доения в конце машинного доения является несвоевременное снятие доильного аппарата с вымени коровы оператором [1].

Одним из факторов, который существенно снижает эффективность технологии машинного доения, являются нарушения, связанные с операторами машинного доения при выполнении ими технологических операций. Исследованиями установлено, что операторы машинного доения зачастую стараются снизить затраты ручного труда, то есть свою физическую нагрузку сокращением подготовки вымени коров к доению. Вследствие чего наблюдается недостаточная стимуляция рефлекса молокоотдачи у животных, приводящая к снижению продуктивности и воспалению их вымени. Известно, что эффективность доильного оборудования напрямую зависит от соблюдения своевременности и длительности технологических операций при машинном доении, так как они во много определены физиологическими функциями молочной железы, а также конструктивными особенностями применяемого доильного оборудования. Поэтому правильная организация и выполнение технологии машинного доения играют значительную роль в повышении молочной продуктивности животных, снижении заболеваний их молочной железы и повышении качества молока. Зачастую операторы машинного доения в силу различных как объективных, так и субъективных причин, нарушают Правила машинного доения, такие как: подмывание вымени, массаж и установка доильных стаканов на соски вымени проводят в течение 10–20 с, вместо положенных 40–60 с; длительность доения 10–12 мин.; отсутствие антисептической обработки сосков и невыполнения машинного доения приводят к снижению продуктивности животных [2].

В своей статье Любимов В.Е. на основании своих исследований утверждает, что очень мало коров с равномерным развитием четвертой вымени, вследствие чего передние четверти выдаиваются быстрее чем задние. Также указывает на различия и по форме вымени, а именно чашеобразной, округлой и козьей форм, передние доли выдаиваются быстрее задних соответственно на 3,3, 14,8 и 27,5 % от общей продолжительности процесса доения вымени в целом. Большинство выпускаемых промышленностью доильных аппаратов, как отмечает автор, универсальны, их работа рассчитана на вымя с одинаково развитыми долями, а рефлекс молокоотдачи у животных происходит по-разному и с разной скоростью молокоотдачи вследствие различия в типологических особенностях их высшей нервной деятельности. Слабый тип высшей нервной деятельности зачастую подвержен стрессу, снижающий надой на 8–10 %, а животные с уравновешенным типом ВНД обеспечивают стабильную молокоотдачу. Из этого следует, что применяемое доильное оборудование не может одинаково пригодным для всех животных. Наиболее физиологичным является тот доильный аппарат, который при доении не вызывает у коров защитных реакций, бережно воздействует на молочную железу, спокойное поведение животного при доении и тем самым обеспечивает полноценный рефлекс молокоотдачи, приводящий к повышению их продуктивности и сохранению здоровья [3].

В своих статьях авторы указывают, что важной характеристикой технологичности молочной железы животных является интенсивность молоковыведения, которая должна протекать синхронно во всех четвертях вымени. Равномерность развития четвертой вымени является важнейшим признаком пригодности коров к машинному доению, которая напрямую влияет на продолжительность «холостого» доения, и, как следствие, реализацию их генетического потенциала и эффективность затрат ручного труда операторов доения. Отмечено, что неполная совместимость технологических параметров доильного аппарата с физиологией молоковыведения коровы приводит к маститам, повреждению тканей вымени, снижению продуктивности, вследствие не полной отдачи молока и в конечном счете к преждевременной выбраковке коров. По данным исследований, диспропорция в развитии долей вымени на 6–10 % ведет к увеличению частоты заболеваний в течение лактации клиническим маститом до 79,5 % животных и, кроме того, животные, которые переболели маститом, не всегда полностью восстанавливают свою прежнюю продуктивность. Поэтому необходимо обращать серьезное внимание на отбор животных по равномерности развития четвертой вымени [4–6].

Наиболее перспективной технологией сегодня является беспривязный способ содержания молочного стада с организацией доения в доильных залах на автоматизированных доильных установках. Применяемые на них автоматы доения обеспечивают в конце доения (при заданной интенсивности потока молока) отключение вакуума и снятие доильных стаканов, то есть позволяют исключить «сухое доение», и минимизируют риски травмирования внутренних тканей вымени животных [7, 8].

Вместе с тем по данным исследователей около 40 % дойного стада в РФ находится на привязи и доятся на линейных доильных установках переносными доильными аппаратами. В связи с этим совершенствование доильного оборудования и технологии машинного доения остается актуальной задачей. Решение этой задачи как указывают авторы, заключается в автоматизации регулирования режимов работы и выполнения заключительных операций машинного доения, исключающей субъективные ошибки операторов машинного доения, на предмет своевременности отключения от вакуума доильного аппарата и снятия с сосков вымени коровы, что значительно снижает заболеваемость вымени маститом. Кроме этого, автоматизация заключительных операций машинного доения позволяет оператору машинного доения качественно выполнить операции по подготовке вымени коровы к доению, что не только способствует полноте выдаивания и повышению продуктивности животных, но и увеличению их хозяйственного использования, а также существенно снижает трудозатраты оператора машинного доения [9–11].

По данным ряда исследователей, доение животных на автоматизированных доильных установках («параллель», «елочка», «карусель» и др.) в доильных залах автоматами доения при их беспривязном содержании не имеют значительных как технологических, так и экономических преимуществ перед доением переносными доильными аппаратами на линейных доильных установках типа «молокопровод» в условиях привязной системы содержания. Тем не менее исследователи подчеркивают важность модернизации доильных систем для всех типов доильных установок, которая заключается именно в автоматизации управления процессом доения. В качестве перспективного направления указывают на полную роботизацию доения, то есть переход к «умным» технологиям [7, 12–15].

Добровольное доение роботами характеризуется изменением метода доения, так как это инновационная технология, создающая максимальный комфорт при доении коров, так как полномочия управления переходит к роботам. Эффективность применения роботов доения способствует росту молочной продуктивности животных, снижает заболеваемость вымени

коров маститом и позволяет вести непрерывный контроль здоровья вымени по электрической проводимости молока или количеству соматических клеток [16, 17].

Однако в своей статье Л.П. Кормановский и И.К. Текучев, анализируя проблемы реализации роботизированных технологий на фермах России, указывают на следующие барьеры их внедрения: высокая стоимость оборудования; отсутствие отечественных аналогов; сложность адаптации к существующим условиям хозяйств; необходимость в высокой квалификации персонала, способного обслуживать сложную электронику, а также работу с программным обеспечением и др. [18, 19].

Нельзя не заметить, что повышением молочной продуктивности особенно у высокопродуктивных коров сопровождается увеличением скорости молокоотдачи, которое приводит к следующим негативным последствиям вследствие дефицита пропускной способности коллектора, то есть его переполнения: нарушение стабильности вакуума; обратный ток молока; спадание доильного аппарата с сосков коровы и др. Перечисленные факторы оказывают негативное влияние на морфологическое и функциональное состояние вымени, то есть возрастает риск заболевания вымени животных и ухудшают санитарно-гигиеническое качество молока.

В последнее время широкое использование получили доильные аппараты попарного принципа действия, управляемые двухпериодными пульсаторами, как правило с электромагнитным управлением и увеличенным объемом коллектора (250 см³ и более), а также с верхним расположением молокоотводящего патрубка. Однако они также не в полной мере соответствуют физиологии животных, хотя обеспечивают более стабильный вакуум под соском, улучшается эвакуация молока, и тем самым исключается обратный ход молока.

По мнению некоторых исследователей, доильные аппараты с коллекторами с верхними расположениями молокоотводящего патрубка обеспечивают эвакуацию молока с большим его потоком и при минимальном колебании вакуумметрического давления под соском. Так как при верхнем отводе движению молока практически нет препятствий, которые характерны при нижнем отводе молока в виде клапана, а также практически не теряется его скорость, и все это способствует повышению пропускной способности доильного аппарата [20, 21].

Результаты исследований и обсуждения. С учетом изложенных факторов нами разработана и адаптирована к универсальным доильным станциям типа «УДС», применяемым в условиях летних лагерей при пастбищной технологии содержания животных, новая конструкция манипулятора доения.

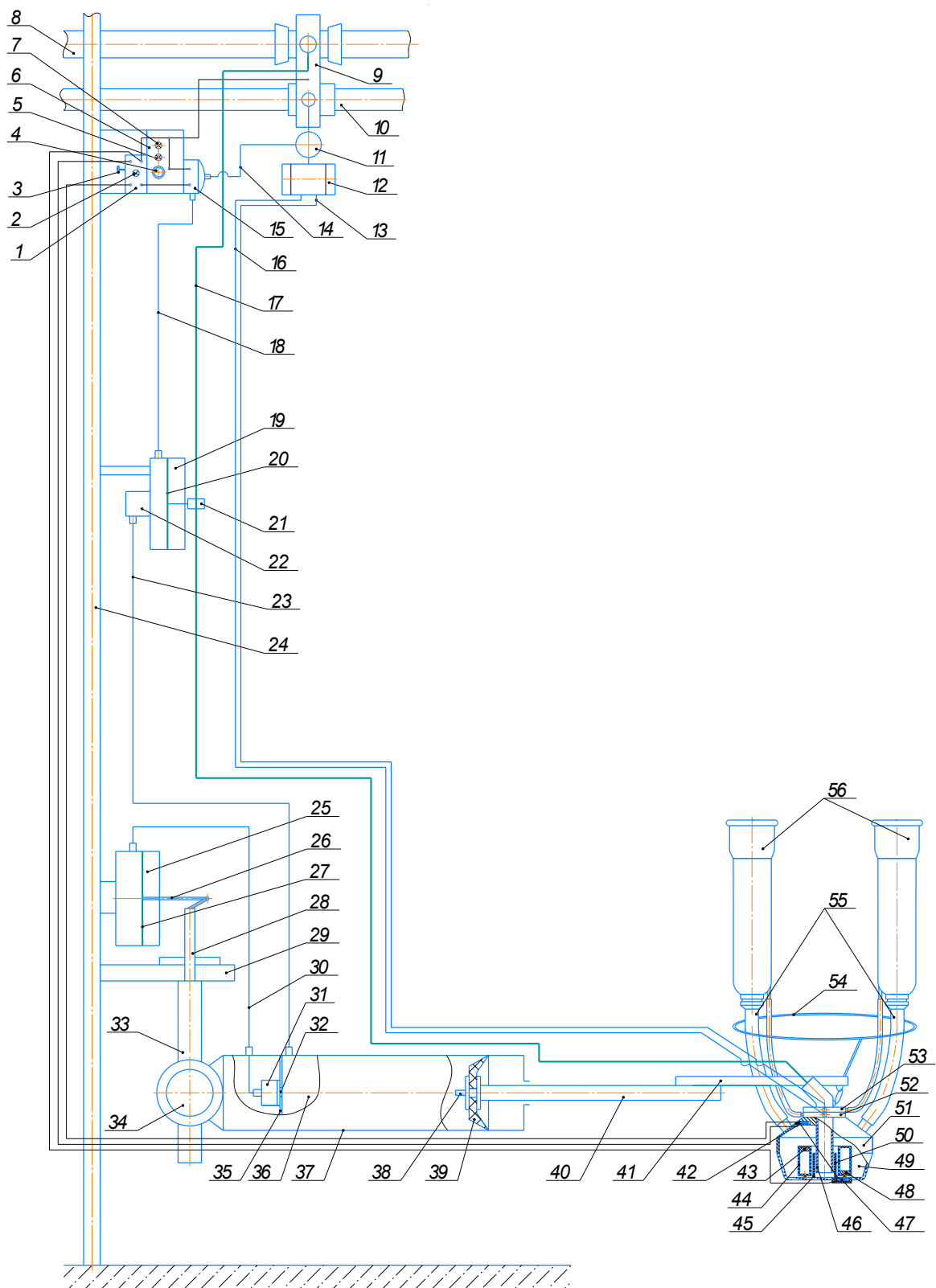
Алгоритм управления манипулятора доения обеспечивает: попарный принцип доения с применением двухпериодного электронного пульсатора, который автоматически регулирует интенсивность доения (соотношение тактов в зависимости от интенсивности потока молока); коллектора увеличенного размера (350 см³) с верхним расположением молокоотводящего патрубка; электромагнитно-пневматический способ управления с исполнительным механизмом – пневмоцилиндр и по типу чувствительного элемента – поплавков с магнитами, расположенном в молочной камере коллектора и соосно магнитам герконы, установленные в корпусе коллектора; отключение подсосковых камер доильных стаканов от вакуума и снятие доильного аппарата с вымени животных при уменьшении интенсивности потока молока до 200 мл/мин. по вымени в целом.

Разработанный манипулятор доения содержит пневмоцилиндр 27, который прикреплен с возможностью изменения его положения по высоте механизма регулировки 34 к стойке 33 (рис. 1).

Поворотная стойка 33 установлена на опоре 29 и кинетически связана с валом 28. Последний тягой 26 связан с мембраной 27 пневмокамеры 25. Шток 40 поршня 39 выполнен из трубы квадратного профиля, на конце которого прикреплен держатель 41 с улавливателем 54.

С рабочей стороны поршень 39 содержит выступ 38. В полости 36 пневмоцилиндра 37 выполнена перегородка 35 с отверстием 32, а с обратной стороны к перегородке 35 соосно прикреплен клапан 31. Доильные стаканы 56 молочными патрубками 55 соединены с коллектором 51, молочная камера 49 которого молокоотводящим патрубком 46 и молочным шлангом 17 соединена через разъем 9 с молокопроводом 8.

В молочной камере 49 коллектора 51 расположен поплавок 44, внутри которого расположены магниты 43 и 48, а в корпусе коллектора 51 соосно им установлены герконы 42 и 47.



1 – электромагнитный клапан; 2, 5, 7 – светодиод; 3, 38, 40 – шток; 4 – кнопка включения; 6 – пульт управления; 8 – молокопровод; 9 – разъем; 10 – вакуумпровод; 11 – распределитель; 12 – электромагнитный пульсатор; 13, 14, 16, 18, 23, 30 – вакуумшланг; 15 – пневмоэлектромагнитный клапан; 17 – молочный шланг; 19 – пневмозажим; 20, 27 – мембрана; 21 – кольцо; 22, 31 – клапан; 24 – стойка станка; 25 – пневмокамера; 26 – тяга; 28 – вал; 29 – опора; 32 – отверстие; 33 – стойка; 34 – механизм регулировки; 35 – перегородка; 36 – полость пневмоцилиндра; 37 – пневмоцилиндр; 39 – поршень; 41 – держатель; 42, 47 – геркон; 43, 48 – магнит; 44 – поплавок; 45 – калиброванное отверстие; 46 – молокоотводящий патрубок; 49 – молочная камера; 50 – стакан; 51 – коллектор; 52, 53 – распределитель переменного вакуума; 54 – улавливатель; 55 – молочный патрубок; 56 – доильный стакан

Рис. 1 – Манипулятор доения

По центру молочной камеры 49 установлен стакан 50, в котором выполнено калиброванное отверстие 45 (пропускная способность калиброванного отверстия – 200 мл/мин.).

Двухполупериодный электромагнитный пульсатор 12 с одной стороны через распределитель 11 соединен с вакуумпроводом 10, а с другой вакуумшлангами 13 и 16 соединен соответственно с распределителями переменного вакуума, соответственно 52, 53 и далее с межстенными камерами соответствующих доильных стаканов 56.

Пневмоэлектромагнитный клапан 15 с одной стороны вакуумшлангом 14 через распределитель 11 соединен с вакуумпроводом 10, а с другой вакуумшлангом 18 с пневмозажимом 19, жестко прикрепленным к стойке станка 24. Клапан 22 пневмозажима 19 вакуумшлангом 23 сообщен с полостью 36 пневмоцилиндра 37. Клапан 31 вакуумшлангом 30 соединен с пневмокамерой 25. Пульт управления 6 содержит светодиоды зеленый 5 и красный 7, кнопку включения 4 и электрически соединен с источником электрической энергии – 12В (на схеме не показано). Герконы 42 и 47 электрически соединены с электромагнитным клапаном 1, который электрически соединен с пневмоэлектромагнитным клапаном 15. Электромагнитный клапан 1 содержит шток 3, синий светодиод 2.

Рассмотрим принцип работы разработанного устройства для доения. Оператор машинного доения запускает корову в доильный станок, фиксирует ее скобой, вращением ручки дозатора выдает концентрат и выполняет операции по подготовке коровы к доению. Затем подключает посредством разъема 9 манипулятор к молокопроводу 8 и вакуумпроводу 10, проворачивает пневмоцилиндр 37 в сторону коровы, вытягивая из него шток 40 с доильным аппаратом и надевает доильные стаканы 56 на соски вымени. При необходимости, в зависимости от расстояния от сосков до пола, оператор механизмом регулировки 34 может изменить положение доильных стаканов в вертикальной плоскости.

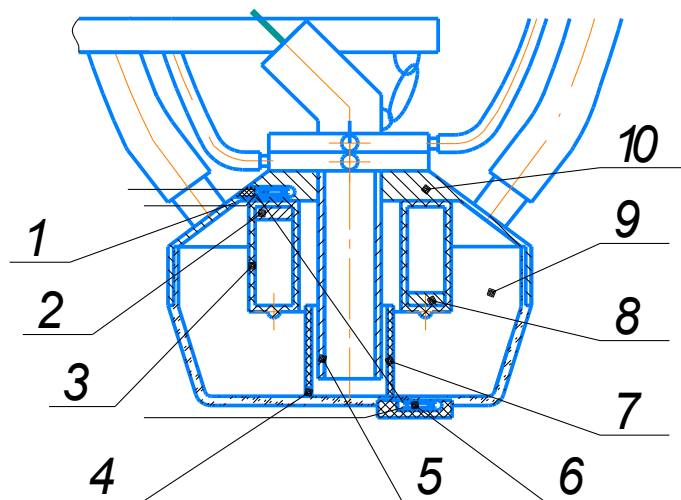
Начинается процесс доения, при этом в начальный момент доения электронный пульсатор обеспечивает частоту пульсаций с соотношением тактов 50/50. После этого оператор осуществляет оттягивание подпружиненного штока 3 электромагнитного клапана 1 и нажимает кнопку 4 пульта управления 6. Загорается зеленый светодиод 5, который указывает оператору доения на поступление напряжения в цепь управления.

При оттягивании штока 3 контакты электромагнитного клапана 1 размыкаются (на схеме не показано), то есть при нижнем положении поплавка 44, когда контакты нижнего геркона 47 замкнуты, к пневмоэлектромагнитному клапану 15 напряжение не поступает.

Молоко из подсосковых камер доильных стаканов 56 поступает в молочную камеру 49 коллектора 51 и далее через калиброванное отверстие 45 в стакане 50, по молокоотводящему патрубку 46, молочному шлангу 17 в молокопровод 8.

С возрастанием интенсивности потока молока более 200 мл/мин. молоко заполняет молочную камеру 9, так как не успевает пройти через калиброванное отверстие 4 в стакане 7.

При этом поплавок 3 с магнитом 2 всплывает и его магнитное поле замыкает контакты геркона 1 (рис. 2).



1, 6 – геркон; 2, 8 – магнит; 3 – поплавок; 4 – калиброванное отверстие; 5 – молокоотводящий патрубок;
7 – стакан; 9 – молочная камера; 10 – корпус

Рис. 2 – Коллектор

При замыкании контактов геркона 1 цепь замыкается и напряжение поступает в обмотку электромагнитного клапана 1, который замыкает электрическую цепь, но напряжение к пневмоэлектромагнитному клапану 15 не поступает, так как контакты геркона 6 разомкнуты.

При этом синий светодиод 5 загорается, информируя оператора машинного доения, что процесс доения перешел в режим «контроль» (рис. 1). При замыкании контактов геркона 42 посылается сигнал на контроллер, который переключает электромагнитный пульсатор 12 на стандартное соотношение тактов – 60/40 и тем самым обеспечивая максимальную интенсивность доения.

В конце доения интенсивность молокоотдачи снижается, уровень молока в молочной камере 49 понижается и поплавок 44 опускается вниз. В результате размыкания геркона 42 прекращается подача управляющего электрического сигнала к электромагнитному пульсатору. Это приводит к изменению электромагнитным пульсатором 12 соотношения тактов 50/50, и за счет этого увеличивается продолжительность фазы сжатия соска, обеспечивая перевод доильного аппарата в щадящий режим доения.

При падении интенсивности потока молока до 200 мл/мин. поплавок 44 занимает нижнее положение. При этом магнитное поле магнита 48 воздействует на геркон 47 и его контакты замыкаются. При замыкании цепи загорается красный светодиод 7, свечение которого сигнализирует об отключении доильных стаканов 56 от вакуумной магистрали и начале их

сьема с сосков вымени. Одновременно с этим пневмоэлектромагнитный клапан 15 открывает доступ вакуума в пневмозажим 19, мембрана которого прогибается и заставляет кольцо 21 пережать молочный шланг 17 и тем самым отключает подсосовые камеры доильных стаканов 56 от источника вакуума.

При пригибании мембраны 22 ее шток (на схеме не показан) в крайнем левом положении воздействует на клапан 22, и при этом вакуум из полости пневмозажима 19 через полость корпуса клапана 21 поступает в пневмоцилиндр 37. При этом поршень 39 пневмоцилиндра 37 перемещается влево вместе со штоком 40, держателем 41 и доильными стаканами 56, снимая доильные стаканы 56 с сосков вымени, которые улавливаются улавливателем 54. Когда поршень 39 займет крайнее левое положение, его выступ 38 воздействует на клапан 31 и вакуум из полости пневмоцилиндра 36 через отверстие 32, корпус клапана 31 и по вакуумшлангу 30 поступает в пневмокамеру 25. Мембрана 27 при поступлении вакуума в пневмокамеру 25 прогибается, увлекая за собой тягу 26, которая при перемещении проворачивает вал 28 со стойкой 33. При этом проворачивается пневмоцилиндр 37, выводя несущую часть манипулятора с доильными стаканами 56 за пределы доильного станка, обеспечивая свободный вход для доения следующего животного в доильный станок.

Таким образом, осуществляется принцип работы разработанного устройства для доения, применительно к универсальным доильным станциям.

Согласно конструкции манипулятора доения и условию работоспособности, управление процессом доения осуществляет поплавков с магнитами при его перемещении в молочной камере коллектора, вследствие изменения в ней уровня молока – напора, то есть в зависимости от интенсивности молокоотдачи в целом по вымени. Магниты поплавка при его перемещении в поплавковой камере своими магнитными полями воздействуют на свои герконы, установленные на разной высоте в корпусе коллектора.

С целью обоснования работоспособности разработанной конструкции манипулятора, расчетным путем необходимо определить следующие параметры: объем поплавка, создающий необходимую выталкивающую силу для преодоления сил, противодействующих его подъему; площадь калиброванного отверстия в стакане коллектора, обеспечивающая заданный расход – 200 мл/мин., для своевременного перехода в режим отключения подсосовых камер доильных стаканов от вакуума и снятия их с вымени животного (рис. 3).

На поплавок действует подъемная сила F_n , значение которой зависит от площади его поперечного сечения и величины его погружения в молоко в поплавковой камере коллектора.

Исходя из вышесказанного, запишем следующее неравенство:

$$F_n \geq (G_n + G_{m1} + G_{m2}), \quad (1)$$

где F_n – выталкивающая сила поплавка, Н; G_n – вес поплавка; G_{m1} – вес магнита №1; G_{m2} – вес магнита № 2.

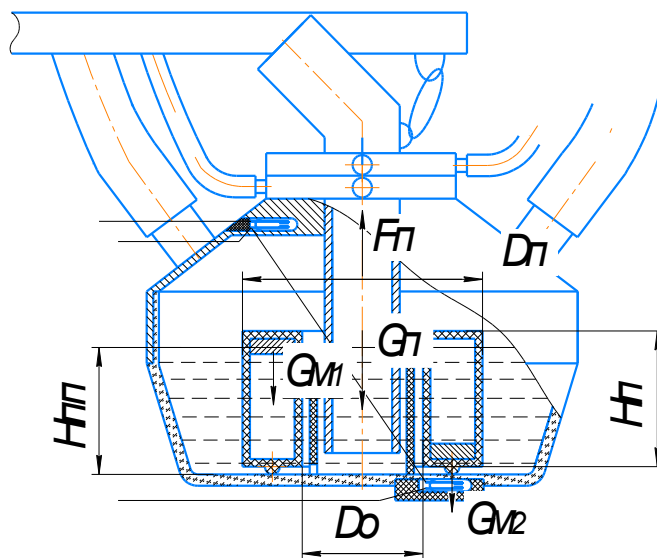


Рис. 3 – Схема сил, действующих на поплавок

Исходя из конструктивных соображений, принимаем размеры магнита и, зная плотность материала, из которого он изготовлен (7,8 Н/см³), определили вес магнита.

Выталкивающую силу поплавка определяем по следующему выражению:

$$F_n = \gamma \cdot W_n, \quad (2)$$

где W_n – объем поплавка, м³; γ – удельный вес молока, Н/м³, (принимаем, $\gamma = 10000 \text{ Н} / \text{м}^3$).

Отсюда объем поплавка равен:

$$W_n = \frac{F_n}{\gamma}. \quad (3)$$

Исходя из вышеизложенного, объем поплавка определяем по следующему выражению:

$$W_n = (S_n - S_{оме}) \cdot H_{nn}, \quad (4)$$

где S_n – площадь поплавка, м²; $S_{отв}$ – площадь отверстия в поплавке, м²; H_{nn} – величина погружения поплавка, м.

Отсюда:

$$W_n = \left(\frac{\pi \cdot D_n^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{отв}^2}{4} \right) \cdot H_{nn}. \quad (5)$$

Преобразовав уравнение (5), получим:

$$H_{nn} = \frac{W_n}{\left(\frac{\pi \cdot D_n^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{отв}^2}{4} \right)}. \quad (6)$$

С учетом уравнений (1), (3) и (6) определяем глубину погружения поплавка в молоко в поплавковой камере:

$$H_{nn} = \frac{4(G_n + G_{м1} + G_{м2})}{\pi \cdot \gamma \cdot (D_n^2 - D_{отв}^2)}. \quad (7)$$

Для надежного перемещения поплавка в поплавковой камере коллекторе его высота должна быть не меньше глубины погружения поплавка в молоко:

$$H_n \geq H_{nn}, \quad (8)$$

где H_n – высота поплавка, м.

С учетом уменьшения удельного веса молока в результате его вспенивания и поступления воздуха в коллектор для лучшей эвакуации молока, чтобы исключить полное погружение поплавка в молоко, необходимо ввести коэффициент, k .

В этом случае уравнение для расчета высоты молока можно записать в следующем виде:

$$H_n = k \cdot H_{nn}, \quad (9)$$

где k – коэффициент, учитывающий уменьшение веса молока в поплавковой камере при его вспенивании ($k = 1, 2 \dots 1, 4$, в зависимости от расчетной высоты поплавка).

Тогда высота поплавка с учетом выражения (4) и (6) будет равна:

$$H_n = \frac{4 \cdot k \cdot (G_n + G_{м1} + G_{м2})}{\pi \cdot \gamma \cdot (D_n^2 - D_{отв}^2)}. \quad (10)$$

Исполнительные механизмы разработанного манипулятора доения, согласно зоотехническим нормам, должны отключать от вакуума и снимать доильный аппарат с вымени при снижении интенсивности молокоотдачи до 200 мл/мин., в целом по вымени. При достижении заданной интенсивности молокоотдачи поплавков с магнитами должен занимать крайнее нижнее положение в молочной камере коллектора, при расчетной глубине его погружения – H_{nn} (рис. 4).

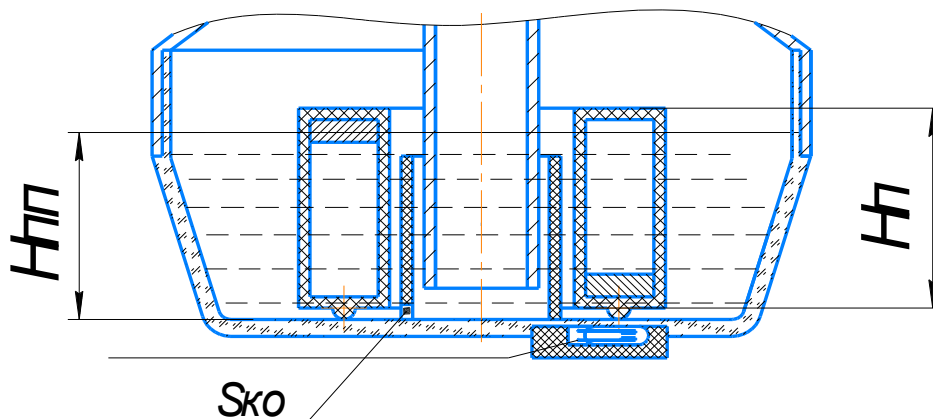


Рис. 4 – К расчету площади калиброванного отверстия

Тогда площадь калиброванного отверстия в стакане коллектора при уровне молока в молочной камере – H_{nn} , по уравнению Бернулли будет равна:

$$Q_{сн} = \mu \cdot S_{كو} \cdot \sqrt{2g \cdot H_{nn}}, \quad (11)$$

где $Q_{сн}$ – заданная интенсивность потока молока при включении режима отключения снятия доильных стаканов с вымени животного, м³/с; μ – коэффициент расхода, $\mu = 0,59 \dots 0,63$; $S_{ко}$ – площадь калиброванного отверстия, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; $H_{пп}$ – глубина погружения поплавка в молоко, м.

Отсюда:

$$S_{ко} = \frac{Q_{сн}}{\mu \cdot \sqrt{2g \cdot H_{пп}}} \quad (12)$$

Полученные зависимости позволяют нам определить конструктивные параметры коллектора манипулятора доения, которые обеспечивают его работоспособность.

На основании проведенных расчетов определены основные конструктивные параметры коллектора: высота поплавка $H_{пп} = 22$ мм, при принятых из конструктивных соображений диаметра поплавка $D_{пп} = 62$ мм и диаметр отверстия в поплавке $D_{отв} = 32$ мм; площадь калиброванного отверстия в стакане коллектора $S_{ко} = 9,83 \cdot \text{мм}^2$, обеспечивающую заданную пропускную способность – 200 мл/мин.

Полученные расчетные данные основных конструктивных параметров исполнительных механизмов разработанного манипулятора и интеграции его в универсальные доильные станции типа «УДС» позволят устранить «человеческий фактор» по определению своевременности отключения и снятия доильного аппарата с вымени животного. Контроль за процессом машинного доения и физиологическое обоснование увеличения молочной продуктивности на 3–5 % за счет оптимизации соотношения тактов, а также своевременное снятие доильных стаканов позволяют снизить заболеваемость вымени маститом на 40–50 %, так как практически исключается «сухое доение», приводящее к микротравмам сфинктера соска и альвеолярной ткани. Автоматизация заключительных операций машинного доения снижает трудоемкость, что позволяет оператору качественно подготовить вымя коровы к доению согласно технологии, то есть полноценную реализацию рефлекса молокоотдачи.

Выводы. При обобщении представленных в статье результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. Выполненный в статье анализ исследований в области автоматизации заключительных операций машинного доения коров показал целесообразность модернизации доильного оборудования путем внедрения систем автоматического управления режимами доения на доильных установках всех типов.

2. Управление процессом доения разработанного манипулятора доения должно осуществляться в соответствии с разработанным алгоритмом, а именно: в начале доения – соотношение тактов 50/50 до достижения интенсивности молокоотдачи по вымени в целом 200 мл/мин.; при увеличении интенсивности молокоотдачи свыше 200 мл/мин. переход доения на стандартное соотношение тактов – 60/40; при окончании доения, то есть при снижении интенсивности молокоотдачи по вымени в целом ниже 200 мл/мин., переключение пульсатора на соотношение тактов 50/50 и отключение от вакуума и снятие доильных стаканов с сосков вымени. Определены основные конструктивные параметры коллектора: диаметр поплавка (принятый из конструктивных соображений) – 62 мм, диаметр отверстия в поплавке – 32 мм, высота поплавка – 22 мм; площадь калиброванного отверстия в стакане коллектора – $9,83 \cdot \text{мм}^2$.

3. Применение на универсальной доильной станции типа «УДС» разработанного манипулятора доения, который обеспечивает изменение соотношения тактов в зависимости от интенсивности молокоотдачи, а также своевременное отключение от вакуума и снятие доильных стаканов с вымени, и тем самым позволяет практически исключить субъективный фактор оператора машинного доения на своевременность выполнения заключительных операций, что снижает заболеваемость вымени коров маститом, повышает молочную продуктивность животных на 3–5 % и сокращает затраты ручного труда.

Библиография

1. Тихомиров И.А., Скоркин В.К., Аксенова В.П., Андрихина О.Л. Продуктивное долголетие коров и анализ причин их выбытия // Вестник ВНИИМЖ. 2016. № 1(21). С. 64–72.
2. Донник И.М., Чеченихина О.С. Система отбора коров черно-пестрой породы при интенсивной технологии производства молока // От импортозамещения к экспортному потенциалу: научное обеспечение инновационного развития животноводства и биотехнологий. 2021. С. 166–168.
3. Любимов В.Е. Физиологические особенности адаптивных реакций коров к машинному доению // Вестник ВНИИМЖ. 2017. № 4(28). С. 10–15.
4. Байлова Н.В. и др. Морфологические признаки и функциональные свойства вымени коров, разводимых в Воронежской области // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 4(55). С. 89–94.
5. Михалёв В.И., Зимников В.И. Автоматизированное доение и заболеваемость коров маститом // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19. № 3. С. 507–516.
6. Чеченихина О.С., Лиходеевская О.Е. Факторы, влияющие на уровень молочной продуктивности коров при доении в доильных залах // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2018. № 3(48). С. 108–116.
7. Лукманов Р.Р. К вопросу автоматизации процесса машинного доения коров / Р. Р. Лукманов, Б. Г. Зиганшин, И. Н. Газизов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2012. Т. 7, № 3(25). С. 87–91.
8. Борозенцев В.И. К разработке алгоритма управления манипулятора доения коров // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 4(32). С. 73–80.
9. Лачуга Ю.Ф. и др. Научно-техническое обеспечение развития НИОКР по механизации автоматизации животноводства // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2025. № 5. С. 87–91.
10. Морозов Н.М. Экономическая эффективность и цифровизация животноводства // Техника и оборудование для села. 2019. № 4. С. 2–7.
11. Ужик В.Ф., Борозенцев В.И. К обоснованию конструктивных параметров автомата доения // XI Международный симпозиум по машинному доению сельскохозяйственных животных. Казань, 2003. С. 49–54.

12. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Шилин Д.В., Рузин С.С., Юрочка С.С. Концепция, модели и схемы дифференцированного управления в роботизированном манипуляторе доения // *Аграрная наука Евро-СевероВостока*. 2021. № 22(1). С. 128–135.
13. А.с. № 1699385 SU, МПК А01 J7/00. Манипулятор доильной установки / Заявители: В. Ф. Ужик, В. И. Борозенцев, А. В. Бурменко. Заявл. 11.12.1989; опубл. 23.12.1991 г. 9 с.: 7 ил.
14. Ужик В.Ф., Борозенцев В.И. К обоснованию конструктивных параметров автомата доения коров // *Инновационные пути развития АПК на современном этапе. Материалы XVI Международной научно-производственной конференции*. 2012. С. 209.
15. Дядичкина Т.В., Пужайкин В.Е. Стационарные доильные установки, преимущества и перспективы развития // *Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы. Материалы IX Национальной научно-практической конференции с международным участием*. Кемерово. 2022. С. 645–648.
16. Чеченихина О.С. Эффективность внедрения роботизированной системы доения крупного рогатого скота // *Аграрный вестник Урала*. 2018. № 8(175). С. 11.
17. Жирков Е.В., Чеченихина О.С. Эффективность применения роботизированных установок при получении высококачественного молока // *Научные высказывания*. 2022. № 14(22). С. 12–16.
18. Текучев И.К., Кормановский Л.П. Модернизация ферм – основа технической политики в молочном скотоводстве // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2018. № 1(29). С. 74–88.
19. Горелик О.В. и др. Принципы и эффективность работы роботизированной системы доения коров // *Главный зоотехник*. 2022. № 2(223). С. 41–48.
20. Борозенцев В.И., Букша Д.В. К обоснованию конструкции коллектора доильного аппарата с верхним отводом молока // *Материалы XXIX Международной научно-производственной конференции «Вызовы и инновационные решения в аграрной науке»*. Белгород, 2025. С. 19–20.
21. Панферов Н.С. Теоретические исследования доильного аппарата с верхним отводом молока из коллектора // *Научный журнал КубГАУ*. 2017. № 126(02). С. 1–12.

References

1. Tikhomirov I.A., Skorkin V.K., Aksenova V.P., Andryukhina O.L. Produktivnoye dolgoletie korov i analiz prichin ikh vybytiya [Productive longevity of cows and analysis of the reasons for their attrition] // *Vestnik VNIIMZH*. 2016. № 1(21). S. 64–72.
2. Donnik I.M., Chechenikhina O.S. Sistema otbora korov cherno-pestroy porody pri intensivnoy tekhnologii proizvodstva moloka [The system of selection of black-and-white cows under intensive milk production technology] // *Ot importozameshcheniya k eksportnomu potentsialu: nauchnoye obespecheniye innovatsionnogo razvitiya zhivotnovodstva i biotekhnologii*. 2021. S. 166–168.
3. Lyubimov V.Ye. Fiziologicheskiye osobennosti adaptivnykh reaktivnykh korov k mashinnomu doyeniyu [Physiological features of adaptive reactions of cows to machine milking] // *Vestnik VNIIMZH*. 2017. № 4(28). S. 10–15.
4. Baylova N.V. i dr. Morfologicheskiye priznaki i funktsional'nyye svoystva vymeni korov, razvodi-mykh v Voronezhskoy oblasti [Morphological features and functional properties of the udder of cows bred in the Voronezh region] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. № 4(55). S. 89–94.
5. Mikhalov V.I., Zimnikov V.I. Avtomatizirovannoye doeniye i zabolevayemost' korov mastitom [Automated milking and the incidence of mastitis in cows] // *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo*. 2024. T. 19. № 3. S. 507–516.
6. Chechenikhina O.S., Likhodeyevskaya O.Ye. Faktory, vliyayushchiye na uroven' molochnoy produktivnosti korov pri doenii v doil'nykh zalakh [Factors influencing the level of milk productivity of cows during milking in milking parlors] // *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018. № 3(48). S. 108–116.
7. Lukmanov R.R. K voprosu avtomatizatsii protsessa mashinnogo doeniya korov [On the issue of automation of the process of machine milking of cows] / R. R. Lukmanov, B. G. Ziganshin, I. N. Gayaziev // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. Kazan', 2012. T. 7, № 3. S. 87–91.
8. Borozentsev V.I. K razrabotke algoritma upravleniya manipulyatora doeniya korov [On the development of a control algorithm for a cow milking manipulator] // *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2021. № 4(32). S. 73–80.
9. Lachuga Yu. F. i dr. Nauchno-tehnicheskoye obespecheniye razvitiya NIOKR po mekhanizatsii avtomatizatsii zhivotnovodstva [Scientific and technical support for the development of R & D on the mechanization of automation of animal husbandry] // *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2025. № 5. S. 87–91.
10. Morozov N.M. Ekonomicheskaya effektivnost' i tsifrovizatsiya zhivotnovodstva [Economic efficiency and digitalization of animal husbandry] // *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2019. № 4. S. 2–7.
11. Uzhik V.F., Borozentsev V.I. K obosnovaniyu konstruktivnykh parametrov avtomata doeniya [On the substantiation of the design parameters of the automatic milking machine] // *KHI Mezhdunarodnyy simpozium po mashinnomu doenyiu sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh*. Kazan', 2003. S. 49–54.
12. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Ruzin S.S., Yurochka S.S. Kontseptsiya, modeli i skhemy differentsirovannogo upravleniya v robotizirovannom manipulyatore doeniya [Concept, models and schemes of differentiated control in a robotic milking manipulator] // *Agrarnaya nauka Yevro-SeveroVostoka*. 2021. № 22(1). S. 128–135.
13. А.с. № 1699385 SU, МПК А01 J7/00. Манипулятор доильной установки [Milking machine manipulator] / Заявители: В. Ф. Ужик, В. И. Борозенцев, А. В. Бурменко. Заявл. 11.12.1989; опубл. 23.12.1991 г. 9 с.: 7 ил.
14. Uzhik V.F., Borozentsev V.I. K obosnovaniyu konstruktivnykh parametrov avtomata doeniya korov [On the substantiation of the design parameters of an automatic cow milking machine] // *Innovatsionnyye puti razvitiya APK na sovremennom etape. Materialy KHVI Mezhdunarodnoy nauchno-proizvodstvennoy konferentsii*. 2012. S. 209.
15. Dyadichkina T.V., Puzhaykin V.Ye. Statsionarnyye doil'nyye ustanovki, preimushchestva i perspektivy razvitiya [Stationary milking installations, advantages and development prospects] // *Aktual'nyye nauchno-tehnicheskkiye sredstva i sel'skokhozyaystvennyye problemy. Materialy IKH Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyu Kemero-vo*. 2022. S. 645–648.
16. Chechenikhina O.S. Effektivnost' vnedreniya robotizirovannoy sistemy doeniya krupnogo rogatogo skota [Efficiency of the implementation of a robotic milking system for cattle] // *Agrarnyy vestnik Urala*. 2018. № 8(175). S. 11.

17. Zhirkov Ye.V., Chechenikhina O.S. Effektivnost' primeneniya robotizirovannykh ustanovok pri poluchenii vysokokachestvennogo moloka [Efficiency of using robotic installations in obtaining high-quality milk] // Nauchnyye vyskazyvaniya. 2022. № 14(22). S. 12–16.

18. Tekuchev I.K., Kormanovskiy L.P. Modernizatsiya ferm – osnova tekhnicheskoy politiki v molochnom skotovodstve [Farm modernization – the basis of technical policy in dairy farming] // Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva. 2018. № 1(29). S. 74–88.

19. Gorelik O.V. i dr. Printsipy i effektivnost' raboty robotizirovannoy sistemy doeniya korov [Principles and efficiency of a robotic milking system for cows] // Glavnyy zootekhnik. 2022. № 2(223). S. 41–48.

20. Borozentsev V.I., Buksha D.V. K obosnovaniyu konstruksii kollektora doil'nogo apparata s verkhnim otvodom moloka [To justify the design of a milking machine collector with top milk drainage] // Materialy XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-proizvodstvennoy konferentsii «Vyzovy i innovatsionnyye resheniya v agrarnoy nauke». Belgorod, 2025. S. 19–20.

21. Panferov N.S. Teoreticheskiye issledovaniya doil'nogo apparata s verkhnim otvodom moloka iz kollektora [Theoretical studies of a milking machine with top milk drainage from the collector] // Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2017. № 126(02). S. 1–12.

Сведения об авторах

Борозенцев Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, тел. 8(4722) 38-19-48, e-mail: borozentsev_v@mail.ru;

Бекетов Анатолий Викторович, аспирант второго года обучения инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503.

Information about authors

Borozentsev Vladimir Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor of the faculty of engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, tel. 8(4722) 38-19-48, e-mail: borozentsev_v@mail.ru;

Beketov Anatoly Viktorovich, second-year postgraduate student of the faculty of engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, Maysky settlement, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503.

УДК 631.363

С.Ф. Вольвак

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОГО КОМБИКОРМОВОГО АГРЕГАТА

Аннотация. Разработка конструкции малогабаритного комбикормового агрегата для приготовления рассыпного комбикорма из собственного сырья и покупных добавок в условиях фермерских хозяйств является актуальной научной задачей. Целью исследований является разработка, обоснование и экспериментальная отработка конструкции малогабаритного комбикормового агрегата, удовлетворяющей требованиям по обеспечению прямооточности построения и непрерывности технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов при требуемом качестве готового продукта. На основании анализа существующих конструкций и научных исследований технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов разработана, обоснована и экспериментально отработана конструкция малогабаритного комбикормового агрегата в составе с многокомпонентным барабанным дозатором и молотковым измельчителем-смесителем. Подтверждена работоспособность конструкции и соответствие её зоотехническим требованиям, определены рациональные значения параметров рабочих органов: частота вращения вертикального вала 1000–2000 мин⁻¹; 8, 12 и 16 молотков на барабане; диаметр отверстий в сменном решете 3, 4 и 6 мм; по 2 и 4 лопасти шириной 32 и 50 мм, при удельной энергоёмкости процесса приготовления рассыпного комбикорма в пределах 3–4 кВт·ч/т. Для разных видов животных и птицы в зависимости от заданного рецепта и объёмной массы сыпучих компонентов за счёт изменения сочетания параметров рабочих органов предусмотрена возможность адаптации конструкции к изменяющимся условиям приготовления рассыпных комбикормов в фермерских хозяйствах, что повышает эффективность технологического процесса малогабаритного комбикормового агрегата по сравнению с другими аналогичными конструкциями.

Ключевые слова: малогабаритный комбикормовый агрегат, рассыпной комбикорм, многокомпонентный барабанный дозатор, молотковый измельчитель-смеситель, рациональные параметры рабочих органов, удельная энергоёмкость, качество готового продукта.

SUBSTANTIATION OF THE DESIGN OF A SMALL-SIZED COMPOUND FEED UNIT

Abstract. The development of a small-sized compound feed unit for the production of loose compound feed from own raw materials and purchased additives in farm conditions is an urgent scientific task. The purpose of the research is to develop, substantiate, and experimentally test a small-sized compound feed unit design that meets the requirements for ensuring the directness and continuity of the technological process of preparing loose feed at the required quality of the finished product. Based on the analysis of existing designs and scientific research on the technological process of preparing loose compound feed, a small-sized compound feed unit with a multi-component drum dispenser and a hammer grinder-mixer has been developed, substantiated, and experimentally tested. The design's functionality and compliance with zootechnical requirements have been confirmed, and the rational values of the working bodies parameters have been determined: the vertical shaft rotates at a speed of 1000–2000 min⁻¹; the drum has 8, 12, and 16 hammers; the diameter of the holes in the replaceable sieve is 3, 4, and 6 mm; the 2 and 4 blades with a width of 32 and 50 mm, and the specific energy intensity of the process is 3–4 kW·h·t⁻¹. For different types of animals and poultry, depending on the specified recipe and the bulk weight of the loose components, the design can be adapted to the changing conditions of making loose compound feed in farms by changing the combination of parameters of the working bodies, which increases the efficiency of the technological process of the small-sized compound feed unit compared to other similar designs.

Keywords: small-sized compound feed unit, loose compound feed, multi-component drum dispenser, hammer grinder-mixer, rational parameters of the working bodies, specific energy intensity, quality of the finished product.

Введение. Одними из основных задач Комплексного плана научных исследований подпрограммы «Развитие производства кормов и кормовых добавок для животных» Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 годы являются «разработка новых технологий производства комбикормов и добавок, выдача исходных требований и разработка технических заданий на новое оборудование отечественного производства с показателями не ниже предусмотренных в задачах подпрограммы».

Известно [1], что «выход животноводческой продукции зависит на 25–35 % от генетического потенциала, и примерно на 10–20 % от условий содержания, а оставшаяся часть 45–65 % от качества поедаемого корма и рациона питания животного» [2].

Анализ технологических схем приготовления рассыпных комбикормов показал, что «применение сыпучих кормовых смесей и рассыпных комбикормов является наиболее оптимальной формой сбалансирования рационов сельскохозяйственных животных и птицы в условиях сельскохозяйственных предприятий» [3].

Анализ операционных схем приготовления комбикормов-концентратов в условиях животноводческих предприятий [1] показал, что с развитием технологий при приготовлении комбикормов используют различные, в том числе традиционные, технологические схемы с применением обязательных операций: предварительной очистки (при необходимости), дозирования согласно рецептуре, измельчения и последующего смешивания. При «отсутствии непрерывности обработки продукта возникает потребность в наличии дополнительных операций оборудования по накоплению и транспортировке порций корма» [1].

В связи с этим «при выборе той или иной схемы необходимо учитывать простоту исполнения и надёжность выполнения технологического процесса. Большинство видов технологических схем для производства комбикормов-концентратов довольно громоздкие, обладают высокой материалоёмкостью, требуют дополнительных капитальных вложений, ввиду чего не применимы для малых предприятий по производству продукции животноводства» [1].

© Вольвак С. Ф., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Преимущество малогабаритных установок, агрегатов и кормоцехов в том, что «они используются на сельскохозяйственных предприятиях и фермах для приготовления полноценных комбикормов из местного сырья с добавлением привозных белково-витаминных добавок (БВД) и премиксов промышленного производства. Производство комбикормов непосредственно в коллективных или фермерских хозяйствах позволяет сэкономить на транспортных расходах, избежать потерь зерна при перевозках, в необходимой мере использовать собственное сырьё. Если при этом ещё использовать покупные БВД, то можно получить комбикорм высокого качества, в полной мере отвечающий физиологическим потребностям крупного рогатого скота, свиней, овец и других сельскохозяйственных животных. Себестоимость комбикормов собственного производства в 2–3 раза ниже, чем стоимость покупных комбикормов, произведённых на крупных комбикормовых заводах» [4].

Таким образом, разработка конструкции малогабаритного комбикормового агрегата для приготовления рассыпного комбикорма из собственного сырья и покупных добавок в условиях фермерских хозяйств является актуальной научной задачей.

Целью исследований является разработка, обоснование и экспериментальная отработка конструкции малогабаритного комбикормового агрегата, удовлетворяющей требованиям по обеспечению прямооточности построения и непрерывности технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов при требуемом качестве готового продукта.

Объект и методы исследований. Актуальность научных исследований по созданию новой техники для фермерских хозяйств подтверждается современными разработками различных конструкций малогабаритной кормоприготовительной техники для животноводства и птицеводства.

Исследования [1] показали, что «многие предприятия малых форм хозяйствующих субъектов не закупают корма, а приготавливают их на фермах с помощью небольших комплексов, способных выполнять различные технологические операции. Применение кормов, приготовленных в условиях хозяйства на животноводческих предприятиях, снижает вероятность приобретения продукта плохого качества и сокращает затраты на транспортирование корма, хранение и приготовление» [5, 6].

Обзорный анализ технологических линий кормоцехов [1], применимых для малых ферм сельскохозяйственных предприятий, позволил выделить четыре основные технологические схемы приготовления комбикормов-концентратов на животноводческих предприятиях, которые имеют свои преимущества и недостатки. «В случае использования классической схемы предусмотрено применение объёмных дозаторов, а также использование смесителей непрерывного действия. Следующие схемы работают с использованием весового дозирования и периодического перемешивания компонентов комбикормов-концентратов» [1].

При этом одним из основных принципов построения технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов является реализованный в малогабаритных комбикормовых агрегатах прямооточный способ, характеризующийся наибольшей эффективностью, малой энерго- и металлоёмкостью, простотой в обслуживании и адаптацией к условиям производства комбикормов непосредственно в хозяйствах [3].

Прямоточная схема позволяет «достичь высокой производительности, а также сократить количество используемого оборудования и снизить удельный расход электроэнергии» [4].

Автор [1] отмечает, что «операция измельчения является энергоёмким процессом, несмотря на способы измельчения и конструкцию машин. Для измельчения кормов основными техническими устройствами являются измельчители (молотковые дробилки) и плющилки. Молотковые дробилки имеют довольно простую конструкцию, что увеличивает их надёжность, компактность, высокую скорость рабочих органов. Дозирование и смешивание являются основными технологическими операциями при производстве концентратов. Они во многом определяют качественные показатели продукции и, как следствие, эффективность применения концентрата» [7].

Многообразие машин, применяемых для измельчения, свидетельствует о том, что до настоящего времени продолжают поиски наиболее рационального типа измельчающей машины, которая наряду с высокой технологической эффективностью, обеспечила бы большую производительность и меньший расход энергии [3].

Теоретический анализ динамики молотковых дробилок [8] с шарнирно подвешенными молотками позволил прояснить физические причины снижения виброактивности дробилок с вертикальной осью вращения ротора (с вертикальным консольным валом, на котором крепится ротор) по «сравнению с дробилками с горизонтальной осью вращения ротора и показал, что шарнирно подвешенные молотки выступают в роли автобалансиров, уменьшающих дисбаланс ротора в целом» [8]. При этом «во-первых, за счёт консольного крепления ротора обеспечивается его гибкость и работа в закритических областях. Именно такие режимы обеспечивают самобалансировку за счёт шарнирного крепления молотков. Во-вторых, консольное крепление ротора и вертикальное расположение его оси вращения обеспечивают равномерную начиная с верхних рядов загрузку каждого молотка. Это также способствует самобалансировке ротора» [8].

В связи с этим «положительное свойство дробилок с вертикальным валом – равномерная по окружности барабана загрузка каждого ряда молотков. Поэтому молотки в каждом ряду отклоняются от радиального направления на один и тот же угол. Это гарантирует сохранение статической балансировки ротора во время технологического процесса» [9], что свидетельствует о преимуществе выбора молотковых дробилок с вертикальным валом для дальнейших исследований.

Также отмечается, «чтобы удовлетворить нужды хозяйства, необходимо разрабатывать оборудование с малыми габаритами, небольшой производительностью и энергоёмкостью» [1], а «исследования по разработке компактного, надёжного в работе, простого в обслуживании многокомпонентного дозатора сыпучих кормов являются актуальными» [10].

Таким образом, в условиях фермерских хозяйств для сокращения количества используемого оборудования и снижения удельного расхода электроэнергии при требуемой производительности необходимо использовать прямооточную схему построения непрерывного технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов с применением объёмного многокомпонентного дозатора и молоткового измельчителя-смесителя с вертикальным валом в единой конструкции малогабаритного комбикормового агрегата.

В соответствии с этим и с учётом ранее проведённых исследований [11-14], анализа конструкций используемого оборудования в условиях фермерских хозяйств и характера протекания процессов дозирования, измельчения и смешивания сухих сыпучих компонентов рассыпного комбикорма в качестве объекта дальнейших исследований выбран малогабаритный комбикормовый агрегат [15-17] (МКА).

При этом «в широком смысле экспериментальная отработка любого сложного технического объекта – один из важнейших компонентов обеспечения и контроля заданных уровней его качества. Именно на этой стадии создания новой техники можно получить экспериментальные показатели, определяющие действительный технический уровень объекта» [18].

При разработке, обосновании и экспериментальной отработке конструкции малогабаритного комбикормового агрегата использованы методы: анализа, классификации и выбора рабочих органов существующих конструкций дозаторов, измельчителей и смесителей сыпучих компонентов рассыпного комбикорма; построения принципиальной конструктивно-технологической схемы; структурирования, моделирования и проектирования технического объекта; однофакторного экспериментального исследования; определения показателей качества готового продукта.

Результаты исследований и их обсуждение. Применительно к нашим исследованиям эффективность технологического процесса приготовления полнорационного рассыпного комбикорма для кур-несушек кросса «Хайсекс коричневый», рецепт которого рассчитан с помощью программного комплекса «Корм Оптима» для пяти сыпучих компонентов: зерно пшеницы, кукурузы и сои, жмых подсолнечный дроблёный, смесь обогатительных добавок (премикс П1-2, известняковая мука, монокальцийфосфат и др.) [17], характеризуется двумя показателями – энергоёмкостью процесса и качеством готового продукта [19].

В связи с этим основными задачами разработки, обоснования и экспериментальной отработки конструкции малогабаритного комбикормового агрегата являются:

- исследование основных принципов прямоточности и непрерывности технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов для кур-несушек, обеспечивающих минимизацию энергоёмкости процесса при соблюдении заданного зоотехническими требованиями качества готового продукта;
- определение основных операций прямоточного непрерывного технологического процесса приготовления рассыпного комбикорма для кур-несушек в установленной пропорции по заданному рецепту;
- оценка правильности схемных и конструктивных решений, при необходимости их корректировка;
- проверка работоспособности и отработка функционирования отдельных конструктивных узлов и МКА в целом в лабораторных условиях;
- определение технических характеристик в диапазоне условий применения;
- исследование и устранение причин возможных неисправностей;
- отработка технологии эксплуатации.

При этом для оценки качества приготовления рассыпного комбикорма для кур-несушек целесообразно учитывать зоотехнические требования [20-23]: максимальная погрешность дозирования пшеницы – до $\pm 1,5\%$, остальных компонентов – до $\pm 1,0\%$; модуль помола зерна – 1,8–2,6 мм (крупный помол) [24, 25]; степень однородности смешивания – не менее 90% [26], а также крупность готового продукта – по ГОСТ Р 51851-2001 «Комбикорма для сельскохозяйственной птицы. Номенклатура показателей».

На основании ранее проведённых исследований для соответствия требованиям к реализации прямоточного непрерывного технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов в установленной пропорции по заданному рецепту в конструкции разрабатываемого малогабаритного комбикормового агрегата использованы пятикомпонентный барабанный дозатор непрерывного действия для дозирования сухих сыпучих компонентов и измельчитель-смеситель вертикального типа для измельчения и смешивания компонентов в процессе измельчения молотковым барабаном и окончательного смешивания и получения комбикорма в процессе выгрузки лопастной швырлякой.

Прямоточный непрерывный технологический процесс приготовления рассыпных комбикормов в установленной пропорции по заданному рецепту в разрабатываемом МКА построен на следующих основных принципах:

- сокращение и совмещение транспортных и технологических операций;
- поточная обработка сыпучих компонентов от исходного сырья до выпуска готовой продукции, что обеспечивает требуемую производительность и снижение энерго- и металлоёмкости при соблюдении требований техники безопасности;
- применение способов объёмного дозирования и ударного измельчения, что позволяет выполнить зоотехнические требования;
- использование создаваемого воздушного потока, интенсифицирующего процессы подачи, измельчения, смешивания, выгрузки, транспортировки и отделения сыпучих компонентов [16], что способствует получению однородного состава готового продукта.

Технологический процесс приготовления рассыпного комбикорма в разрабатываемом МКА включает следующие основные операции [11]:

- приём, подготовка и очистка исходного сырья (при необходимости);
- распределение сухих сыпучих компонентов по секциям бункера;
- объёмное непрерывное и одновременное дозирование всех сыпучих компонентов в установленной пропорции по заданному рецепту;
- ударное измельчение компонентов с их одновременным смешиванием;
- выгрузка компонентов с их окончательным смешиванием;
- подача полученной кормовой смеси в циклон-разгрузитель и далее в передвижной контейнер готового продукта;
- хранение и выдача рассыпного комбикорма.

Это соответствует выдвинутой концепции повышения эффективности технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов путём объединения систем дозирования, измельчения и смешивания сухих сыпучих кормов в единую конструкцию МКА, что обеспечивает прямоточность построения и непрерывность технологического процесса, и способствует получению более однородного состава готового продукта в установленной пропорции.

Ранее с помощью методов однофакторного экспериментального исследования пятикомпонентного барабанного дозатора кормов с последующей статистической обработкой массива данных [27] определены [17]: средние арифметические значения объёмной массы исходных компонентов рассыпного комбикорма при кондиционной влажности до 9,0 %; расчётная подача и рациональные значения параметров звёздочек ячеистого барабана; средневзвешенный диаметр частиц исходных компонентов; средняя производительность и относительная погрешность производительности дозатора (коэффициент вариации подачи), удельная энергоёмкость процесса дозирования (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты исследования барабанного дозатора кормов [17]

Компоненты рассыпного комбикорма		Объёмная масса	Средневзвешенный диаметр частиц	Средняя производительность	Погрешность дозирования
Состав	%	кг/м ³	мм	кг/ч	%
1 Пшеница	35	781,5	3,6	111,251	0,516
2 Соя	15	740,3	6,6	47,410	0,367
3 Добавки	11,445	1155,7	0,4	36,698	0,229
4 Жмых	15	607,4	2,1	47,915	0,242
5 Кукуруза	23,555	671,7	7,1	74,381	0,282
Всего	100	–	–	317,655	0,258

В связи с этим при экспериментальной отработке конструкции МКА зафиксирована подача по каждому из пяти исходных компонентов комбикорма и, соответственно, суммарная подача 317,7 кг/ч (таблица 1).

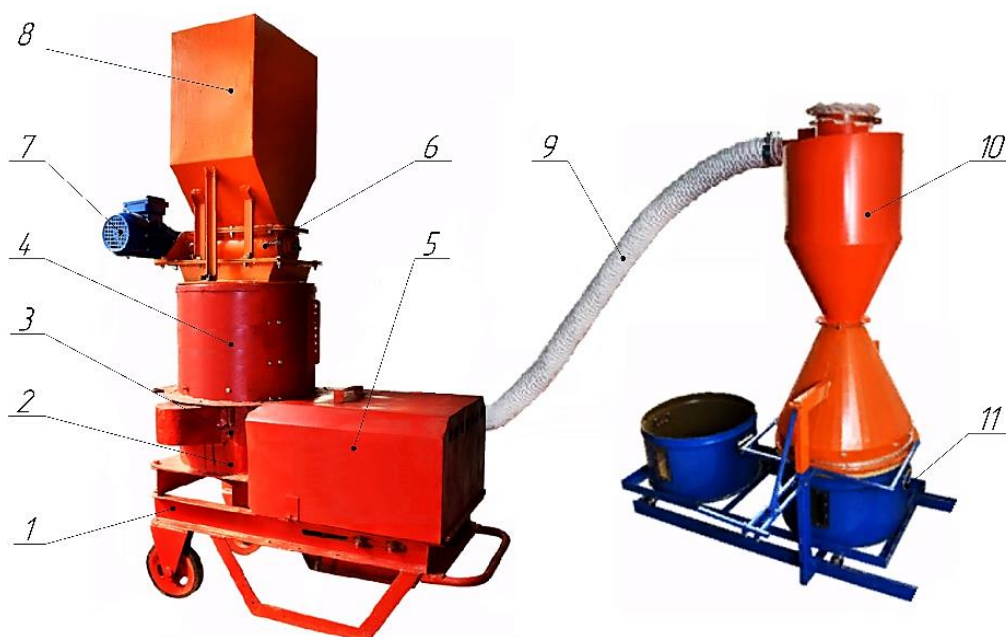
Автор статьи как разработчик конструкции принимал участие [28, 29] в приёмочных испытаниях малогабаритного универсального измельчителя-смесителя кормов фермерского ИУФ-1, в результате которых определены его основные показатели работы и параметры рабочих органов.

В исследовании [30] с участием автора статьи обоснована потребная производительность ИУФ-1 при измельчении зерновых продуктов и её зависимость от конструктивно-технологических параметров молоткового барабана.

В исследовании [31] установлены оптимальные конструктивно-технологические параметры рабочих органов ИУФ-1 при измельчении зерновых продуктов.

Таким образом, на основании приёмочных испытаний и экспериментально-теоретических исследований измельчителя-смесителя ИУФ-1 при измельчении зерновых продуктов, поисковых исследований, предварительных опытов и однофакторных экспериментов в качестве измельчающе-смешивающего устройства выбрана конструкция перспективного в эксплуатационном плане измельчителя-смесителя ИУФ-1 [32] с электродвигателем мощностью 1,5 кВт, а в качестве дозирующего устройства выбран пятикомпонентный барабанный дозатор, на общем горизонтальном валу составного ячеистого барабана которого размещены пять сменных звёздочек и диски между ними с приводом от компактного червячного мотор-редуктора серии NMRV030-30-30-0,12кВт-63B14 с электродвигателем мощностью 0,12 кВт [17].

На основании вышеизложенного для проведения экспериментальной отработки разработана и изготовлена конструкция малогабаритного комбикормового агрегата, которая содержит раму 1 с ручкой, опорными колёсами и салазками, к которой прикреплены составной цилиндрический корпус с выгрузной 2, измельчающей 3 и приёмной 4 камерами и откидной капот 5 (рисунок 1). Над приёмной камерой 4 расположены пятикомпонентный барабанный дозатор 6 с мотор-редуктором 7 и пятисекционный бункер 8 с перегородками. Под капотом 5 размещён электродвигатель с клиноременной передачей для привода вертикального вала. В измельчающей камере 3 на вертикальном валу закреплён молотковый барабан с шарнирно подвешенными молотками и установлено сменное решето. В выгрузной камере 2 на вертикальном валу закреплена лопастная швырялка. Выгрузная камера 2 посредством спирально-витого шланга 9 соединена с циклоном-разгрузителем 10, под которым размещена система сменных контейнеров 11 для готового продукта.



1 – рама с ручкой, опорными колёсами и салазками; 2 – выгрузная камера; 3 – измельчающая камера; 4 – приёмная камера; 5 – откидной капот; 6 – пятикомпонентный барабанный дозатор; 7 – мотор-редуктор; 8 – пятисекционный бункер с перегородками; 9 – спирально-витой шланг; 10 – циклон-разгрузитель; 11 – система сменных контейнеров

Рис. 1 – Общий вид малогабаритного комбикормового агрегата

Технологический процесс приготовления рассыпного комбикорма происходит следующим образом. Перед включением МКА в работу проверяют состояние его рабочих органов: барабанного дозатора, молоткового барабана, сменного решета и лопастной швырлялки, а также контрольно-измерительных приборов и пускозащитной аппаратуры.

Сначала включают в работу измельчитель-смеситель, после набора номинальных оборотов молоткового барабана включают в работу барабанный дозатор. Пять компонентов рассыпного комбикорма по заданному рецепту из каждой секции пятисекционного бункера самотёком под действием силы тяжести непрерывно заполняют ячейки вращающихся на общем горизонтальном валу с приводом от мотор-редуктора сменных звёздочек барабанного дозатора и затем высыпаются из них в виде отмеренных порций и попадают в приёмную камеру, чем обеспечивается непрерывность процесса их дозирования.

В приёмной камере за счёт создания воздушного потока вращающимися молотковым барабаном и лопастной швырлялкой обеспечивается формирование кольцевого продуктово-воздушного слоя с нисходящим круговым по спирали направлением движения сыпучих компонентов рассыпного комбикорма.

Прижимаясь к внутренней поверхности и опускаясь в измельчающую камеру, сыпучие компоненты рассыпного комбикорма попадают на вращающиеся молотки молоткового барабана, под воздействием которых измельчаются, смешиваются и просеиваются через сменное решето.

Измельчённые до заданных размеров и смешанные сыпучие компоненты рассыпного комбикорма попадают в выгрузную камеру и лопастной швырлялкой выбрасываются в виде продуктово-воздушной смеси через выбросное окно и выгрузной патрубок.

Далее продуктово-воздушная смесь по спирально-витому шлангу попадает в циклон-разгрузитель, где продуктовая смесь сыпучих компонентов рассыпного комбикорма отделяется от воздушного потока, прижимается под действием центробежных сил к стенкам циклона-разгрузителя и сползает в сменный передвижной контейнер для сбора готового продукта и перемещения его к месту хранения, а воздух через трубу отводится в атмосферу.

При этом создаваемый воздушный поток, интенсифицируя процессы подачи, измельчения, смешивания, выгрузки, транспортировки и отделения сыпучих компонентов рассыпного комбикорма, способствует улучшению условий непрерывности и равномерности этих процессов и получению однородного состава готового продукта.

В лабораторной экспериментальной установке:

- предусмотрена возможность изменения частоты вращения молоткового барабана, установки молотковых барабанов с разным количеством осей подвеса и рядов шарнирно подвешенных молотков, сменных решёт с разными диаметрами отверстий, лопастных швырлялок с разным количеством лопастей и их шириной;

- использованы контрольно-измерительные приборы: для измерения мощности в трёхфазной цепи переменного тока и контроля загрузки электродвигателей – соответственно, встроенные ваттметр и амперметр измерительного комплекта серии K505, для взвешивания массы навесок компонентов рассыпного комбикорма – весы MASTER MS-10, для регистрации времени опытов – секундомер механический СОСпр-26-2, для контроля частоты вращения горизонтального вала барабанного дозатора – тахометр часовой ТЧ 10-Р, для контроля частоты вращения вертикального вала измельчителя-смесителя – тахометр цифровой Unit UT372;

- рассчитана производительность каждого опыта как отношение суммарной массы пяти порций сыпучих компонентов рассыпного комбикорма к продолжительности опыта;

- принята трёхкратная повторность опытов при заданной надёжности результатов опытов $\alpha = 0,95$ и допустимой ошибке в пределах $\varepsilon = \pm 3 \sigma$ [33, 34].

В связи с тем, что МКА имеет два отдельных электропривода рабочих органов дозатора и измельчителя-смесителя, полезная мощность N , кВт, непосредственно расходующаяся на процесс приготовления рассыпного комбикорма – на дозирование, измельчение, смешивание, выгрузку и транспортировку материала, определена при установившемся режиме работы за вычетом мощности (потерь) холостого хода, т. е.:

$$N = N_p - N_x, \quad (1)$$

где N – суммарная полезная мощность на валах дозатора и измельчителя-смесителя, кВт;

N_p – суммарная потребляемая мощность, замеренная по прибору K505, кВт;

N_x – суммарная мощность холостого хода, замеренная по прибору K505, кВт.

Величина удельной энергоёмкости процесса приготовления комбикорма $\mathcal{E}$, кВт·ч/т, определена по известной формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{N}{Q}, \quad (2)$$

где Q – производительность МКА, т/ч.

При этом выбор электродвигателей для привода дозатора и измельчителя-смесителя произведён с учётом запаса по мощности 15–30 % в зависимости от характера нагрузки и условий эксплуатации.

Техническая характеристика малогабаритного комбикормового агрегата представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Техническая характеристика малогабаритного комбикормового агрегата

Показатель	Значение
Производительность (пропускная способность), кг/ч	до 500
Установленная мощность, кВт:	
- электродвигателя измельчителя-смесителя	1,5
- электродвигателя барабанного дозатора	0,12
Частота вращения ротора электродвигателя измельчителя-смесителя, мин ⁻¹	940
Частота вращения ротора электродвигателя барабанного дозатора, мин ⁻¹	32
Частота вращения вертикального вала, мин ⁻¹	1000–2000
Диаметр барабана при измельчении зерна, мм	307
Количество молотков на барабане, шт.:	
- две оси подвеса и четыре ряда молотков (2×4)	8
- четыре оси подвеса и три ряда молотков (4×3)	12

- четыре оси подвеса и четыре ряда молотков (4×4)	16
Диаметр отверстий в сменных решетках, мм	3; 4; 6
Диаметр ротора швырялки, мм	352
Количество лопастей ротора швырялки, шт.	
- шириной по 32 мм	2
- шириной по 50 мм	2, 4

При проведении экспериментальной отработки изменяли частоту вращения молоткового барабана с помощью преобразователя частоты INNOVERT IVD302B43E и количество молотков на барабане – изменением количества осей подвеса и рядов молотков; измеряли потребляемую мощность в холостом и рабочем режимах и производительность при установившемся режиме работы МКА; определяли величину удельной энергоёмкости процесса приготовления рассыпного комбикорма.

После каждого опыта оценивали качество приготовления рассыпного комбикорма МКА для кур-несушек: производили отбор проб из порции рассыпного комбикорма по ГОСТ 13496.0-2016 «Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы отбора проб», проводили ситовой анализ по ГОСТ 13496.8-72 «Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений», рассчитывали модуль помола частиц, определяли степень однородности смеси и по ГОСТ Р 51851-2001 определяли крупность готового продукта.

В результате проведённой предварительной экспериментальной отработки подтверждена работоспособность конструкции изготовленного опытного образца МКА и определены рациональные значения параметров рабочих органов: частота вращения вертикального вала 1000–2000 мин⁻¹; 8, 12 и 16 молотков на барабане; диаметр отверстий в сменном решете 3, 4 и 6 мм; по 2 и 4 лопасти шириной 32 и 50 мм, при установке которых значения удельной энергоёмкости процесса приготовления рассыпного комбикорма находились в пределах 3–4 кВт·ч/т.

При установке частоты вращения вертикального вала 1500 мин⁻¹; 12 молотков на барабане; диаметре отверстий в сменном решете 4 мм; 2 лопастей шириной по 50 мм, качество приготовления рассыпного комбикорма МКА для кур-несушек соответствовало зоотехническим требованиям по показателям: погрешность дозирования пшеницы – до ±1,5 %, остальных компонентов – до ±1,0 %; модуль помола зерна – от 1,8 до 2,6 мм; степень однородности смеси – более 90 %; а крупность готового продукта соответствовала требованиям ГОСТ Р 51851-2001 для взрослой птицы.

Для разных видов животных и птицы в зависимости от заданного рецепта и объёмной массы сыпучих компонентов рассыпного комбикорма в барабанном дозаторе может быть установлено соответствующее число сменных звёздочек с различными по количеству, геометрической форме и объёму ячейками, а в молотковом измельчителе-смесителе – соответственно, различное сочетание параметров рабочих органов, что говорит о возможности адаптации конструкции малогабаритного комбикормового агрегата к изменяющимся условиям приготовления рассыпных комбикормов непосредственно в фермерских хозяйствах.

Таким образом, на основании анализа существующих конструкций и научных исследований технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов разработана и экспериментально отработана наиболее приемлемая и ресурсосберегающая конструкция малогабаритного комбикормового агрегата с работающими согласованно по требуемой производительности и качеству смеси многокомпонентным барабанным дозатором и молотковым измельчителем-смесителем, что обеспечивает за счёт прямооточности построения и непрерывности технологического процесса минимизацию затрат времени на обработку компонентов в потоке и сокращение пути от исходного сырья до выпуска готового продукта.

Выводы. При обобщении результатов проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. На основании анализа существующих конструкций и научных исследований технологического процесса приготовления рассыпных комбикормов разработана, обоснована и экспериментально отработана конструкция малогабаритного комбикормового агрегата в составе с многокомпонентным барабанным дозатором и молотковым измельчителем-смесителем, выходные характеристики которых позволяют за счёт согласованной работы по производительности и требуемому качеству готового продукта обеспечить прямооточность и непрерывность процесса и, как следствие, снижение энергоёмкости и повышение эффективности процесса приготовления рассыпного комбикорма в установленной пропорции по заданному рецепту.

2. При экспериментальной отработке подтверждена работоспособность конструкции изготовленного опытного образца МКА и соответствие её зоотехническим требованиям, определены рациональные значения параметров рабочих органов: частота вращения вертикального вала 1000–2000 мин⁻¹; 8, 12 и 16 молотков на барабане; диаметр отверстий в сменном решете 3, 4 и 6 мм; по 2 и 4 лопасти шириной 32 и 50 мм, при удельной энергоёмкости процесса приготовления рассыпного комбикорма в пределах 3–4 кВт·ч/т.

3. В конструкции малогабаритного комбикормового агрегата для разных видов животных и птицы в зависимости от заданного рецепта и объёмной массы сыпучих компонентов за счёт изменения сочетания параметров рабочих органов предусмотрена возможность адаптации к изменяющимся условиям приготовления рассыпных комбикормов в фермерских хозяйствах, что повышает эффективность технологического процесса по сравнению с другими аналогичными конструкциями.

4. В перспективе необходимо провести исследования по отработке технологии эксплуатации и оценке качества приготовления рассыпных комбикормов разрабатываемым малогабаритным комбикормовым агрегатом.

Библиография

1. Чупшев А.В. Обоснование перспективной операционной схемы приготовления комбикормов-концентратов в условиях животноводческих предприятий // Нива Поволжья. 2021. № 3(60). С. 135–141. <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.022>.
2. Сыроватка В.И., Мишуров Н.П. Перспективные направления технологического развития сельскохозяйственной системы производства комбикормов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы VIII Международной научно-практической конференции «ИнформАгро-2016». Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. С. 29–34. EDN WOIED.
3. Николаев В.Н. Анализ технологических схем приготовления рассыпных комбикормов в сельскохозяйственных предприятиях. URL: <https://na-journal.ru/6-2024-tehnologii-proizvodstva/13524-analiz-tehnologicheskikh-shem-prigotovleniya-rassypanyh-kombikormov-v-selskohozyaistvennyh-predpriyatiyah>.

4. Ведищев С.М., Капустин В.П., Глазков Ю.Е. [и др.]. Механизация приготовления кормов. Часть 2 : Учебное пособие. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. 127 с. EDN ZGKDTL.
5. Припоров И.Е. Моделирование приготовления комбикормов-концентратов при изменении состава машин и комбикормовых агрегатов // Инженерные технологии и системы. 2024. № 2(34). С. 191–212. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.191-212>.
6. Винницки С., Романюк В., Савиных П.А., Скоркин В.К. Совершенствование технологии кормления высокопродуктивных коров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 3(35). С. 147–151. EDN TJRZPE.
7. Pezo M., Pezo L., Jovanović A.P., Terzić A., Andrić L., Lončar B., Kojić P. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors. Powder Technology. 2018; 366: 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009>.
8. Федоренко И.Я., Мозговых В.В. Динамика молотковой дробилки с вертикальной осью вращения ротора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2009. № 11(61). С. 69–75. EDN KWBCPT.
9. Федоренко И.Я. Динамические свойства молотковой зернодробилки с вертикальным расположением барабана // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 1(195). С. 89–95. EDN CXZKSV.
10. Сабиев У.К., Амрин Р.Н., Кушнерик А.Н. Краткий анализ многокомпонентных дозаторов сыпучих кормов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 2(22). С. 238–241. EDN WJTEZZ.
11. Вольвак С.Ф., Шаповалов В.И. Исследование процесса измельчения концентрированных кормов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 4(36). С. 14–24. EDN KSSZAW.
12. Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Добрицкий А.А. Научные основы совершенствования технологических процессов и технических средств приготовления кормов для сельскохозяйственных животных и птицы : монография. Белгород : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2022. 193 с. ISBN 978-5-6047966-8-9. EDN KJFAQR.
13. Вольвак С.Ф., Шаповалов В.И., Нестерова Н.В. Многокритериальная оценка и выбор дозаторов для конструктивно-технологической схемы малогабаритного мобильного агрегата для приготовления комбикормов // Известия Международной академии аграрного образования. 2015. № 24. С. 24–29. EDN UKIHXB.
14. Volvak S., Pastukhov A., Bakharev D., Dobrickiy A. Theoretical studies of technological process of grinding stalked feed. Engineering for Rural Development. Virtual, Jelgava, 2021. Pp. 831–836. DOI 10.22616/ERDev.2021.20.TF189. EDN VLJUQR.
15. Патент № 2805301 C1 Российская Федерация, МПК A23N 17/00. Комбикормовый агрегат : № 2023112996 : заявл. 18.05.2023 : опубл. 13.10.2023 / С. Ф. Вольвак, В. И. Шаповалов, Д. Н. Бахарев, А. А. Добрицкий ; заявитель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. EDN RRFDDI.
16. Патент № 2853007 C1 Российская Федерация, МПК A23N 17/00. Малогабаритный комбикормовый агрегат : заявл. 09.01.2025 : опубл. 17.12.2025 / С. Ф. Вольвак, В. И. Шаповалов, А. Г. Пастухов, Д. Н. Бахарев ; заявитель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. EDN HWLPDG.
17. Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Кошаев И.А. Обоснование конструкции барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 1(45). С. 14–24. EDN NBIGLJ.
18. Экспериментальная отработка как элемент системы управления качеством. URL: <https://oobskspetsavia.ru/2015/11/05/eksperimentalnaya-otrabotka-kak-element-sistemy-upravleniya-kachestvom/>
19. Передиа В.И., Романович А.А. Экспериментальные исследования оборудования для производства легкоусвояемого жидкого корма для свиней // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 3(43). С. 54–61. DOI 10.51794/27132064-2021-3-54. EDN TCKHBV.
20. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Брагинцев С.В., Бахчевников О.Н., Ольшевская А.В. Технологии и оборудование для производства комбикормов и премиксов : учеб. пособие. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. 228 с.
21. Шкондин В.Н. Разработка способа измельчения кормового зерна и обоснование параметров двухступенчатого измельчителя : дис. ... канд. техн. наук. Зерноград, 2018. 173 с. URL: <https://achaa.pf/files/sovett/Shkondin/dissShkondin.pdf>.
22. Технология обработки пищевых отходов, кормов животного происхождения и приготовления кормовых смесей. URL: <https://gcagro.ru/klientam/poleznye-stati/tehnologiya-obrabotki-pishhevyh-othodov-kormov-zhivotnogo-proishozhdeniya-i-prigotovleniya-kormovyh-smesey.html>.
23. Al-Maidi A.A.H., Himoud M.S., Kaliganov A.C. [et al.] Modelling the quality of the mixture in a continuous paddle mixer // International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. 2021. Vol. 16. Pp. 1769–1774. EDN NIZZWM.
24. Сабиров Б.М., Зиганшин Б.Г., Дмитриев А.В., Нафиков И.Р., Сабирова Р.Р. Исследование устройства для дробления зерна // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 1(69). С. 75–79. DOI 10.12737/2073-0462-2023-73-77. EDN JVHYQP.
25. Khaliullin D., Badretdinov I., Naficov I., Lukmanov R. Theoretical justification of design and technological parameters of hulling machine main working bodies // Engineering for Rural Development. Virtual, Jelgava, 2021. Pp. 1501–1506. DOI 10.22616/ERDev.2021.20.TF321. EDN CAUCPH.
26. Сторожук Т.А. Оптимизация процесса смешивания кормов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 148. С. 31–39. DOI 10.21515/1990-4665-148-003. EDN ZQZHUT.
27. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Добрицкий А.А. Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. № 3. С. 20–26. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN KUELTH.
28. Шаповалов В.И., Вольвак С.Ф., Кондрашина В.Е., Чугунова О.А. Некоторые результаты испытаний малогабаритного универсального, мобильного измельчителя-смесителя кормов для фермеров и личных подсобных хозяйств // Материалы отчетной научно-технической конференции сотрудников ЛСХИ по итогам 1991 года. Луганск : ЛЦНТИ, 1992. С. 97. EDN XCBFDP.
29. Вольвак С.Ф. Обоснование технологического процесса и параметров рабочих органов гибкого универсального малогабаритного кормоприготовительного агрегата в варианте измельчения грубых кормов : дис. ... канд. техн. наук. Луганск, 1998. 244 с. EDN UKSZUV.

30. Шаповалов В.И., Болоташвили З.У., Вольвак С.Ф. Обоснование потребной производительности малогабаритного измельчителя зерновых продуктов // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету : Технічні науки. 2000. № 6/17. С. 43–45. EDN WQQFFZ.

31. Болоташвили З.У. Обоснование технологического процесса измельчения и параметров рабочих органов универсального малогабаритного измельчителя зерновых продуктов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Луганск, 2000. 20 с. EDN ZLUOSV.

32. Шаповалов В.И., Болоташвили З.У., Вольвак С.Ф., Лысенко И.Б. Разработка гибких систем – эффективный путь механизации сельскохозяйственного производства // Вісник Східноукраїнського державного університету. 1996. № 1. С. 169–173. EDN YGTOKV.

33. Кузьмин В.В. Параметры и режимы работы комбинированного агрегата для гладкой вспашки под зерновые колосовые культуры : дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2024. 164 с. URL: <https://kubsau.ru/upload/iblock/3ba/shcxg2rb712g70bcm89zl49py8nmbabw.pdf>.

34. Труфляк Е.В., Труфляк И.С., Кравченко В.С., Гончарова И.А. Методика выбора количества повторностей при проведении экспериментальных исследований // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2008. № 38. С. 1–6. EDN JWXWTT.

References

1. Chupshev A.V. Obosnovanie perspektivnoj operacionnoj shemy prigotovleniya kombikormov-koncentratov v usloviyah zhivotnovodcheskih predpriyatij [Substantiation of a promising operational scheme for the preparation of compound feed concentrates in livestock enterprises] // Niva of the Volga region. 2021. № 3(60). Pp. 135–141. <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.022>.

2. Syrovatka V.I., Mishurov N.P. Perspektivnye napravleniya tehnologicheskogo razvitiya sel'skhozajstvennoj sistemy proizvodstva kombikormov [Promising directions of technological development of the agricultural system for the production of compound feeds] // Scientific and Information Support for Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «InformAgro-2016». Moscow : Rosinformagrotekh, 2016. Pp. 29–34. EDN WOIED.

3. Nikolaev V.N. Analiz tehnologicheskikh shem prigotovleniya rassypnykh kombikormov v sel'skhozajstvennykh predpriyatiyah [Analysis of technological schemes for the preparation of loose compound feeds in agricultural enterprises]. URL: <https://na-journal.ru/6-2024-tehnologii-proizvodstva/13524-analiz-tehnologicheskikh-shem-prigotovleniya-rassypnykh-kombikormov-v-selskoho-zyaistvennykh-predpriyatiyah>.

4. Vedishchev S.M., Kapustin V.P., Glazkov Yu.E. [et al.]. Mehanizaciya prigotovleniya kormov [Mechanization of feed preparation]. Part 2 : Textbook. Tambov : Tambov State Technical University, EBS ASV, 2015. 127 p. EDN ZGKDTL.

5. Priporov I.E. Modelirovanie prigotovleniya kombikormov-koncentratov pri izmenenii sostava mashin i kombikormovykh agregatov [Modeling of the producing concentrated compound feed when changing the compound feed machinery] // Engineering Technologies and Systems. 2024. № 2(34). Pp. 191–212. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.191-212>.

6. Vinnicki S., Romanyuk V., Savinykh P.A., Skorkin V.K. Sovershenstvovanie tehnologii kormleniya vysokoproduktivnykh korov [Improvement of high-production cows' feeding technology]. Bulletin of the All-Russian Research Institute of Animal Husbandry Mechanization. 2019. № 3(35). Pp. 147–151. EDN TJRZPE.

7. Pezo M., Pezo L., Jovanović A.P., Terzić A., Andrić L., Lončar B., Kojić P. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors. Powder Technology. 2018 ; 366 : 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009>.

8. Fedorenko I.Ya., Mozgovykh V.V. Dinamika molotkovoj drobilki s vertikal'noj os'yu vrashcheniya rotora [Dynamics of a hammer crusher with a vertical rotor axis] // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2009. № 11(61). Pp. 69–75. EDN KWBCPT.

9. Fedorenko I.Ya. Dinamicheskie svoystva molotkovoj zernodroibilki s vertikal'nym raspolozheniem barabana [Dynamic properties of a hammer grain crusher with a vertical drum] // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2021. № 1(195). Pp. 89–95. EDN CXZKSV.

10. Sabiev U.K., Amrin R.N., Kushnerik A.N. Kratkij analiz mnogokomponentnykh dozatorov sypuchih kormov [A brief analysis of multicomponent dispensers of bulk feed] // Bulletin of Omsk State Agrarian University. 2016. № 2(22). Pp. 238–241. EDN WJTEZZ.

11. Vol'vak S.F., Shapovalov V.I. Issledovanie processa izmel'cheniya koncentrirovannykh kormov [Investigation of the grinding process of concentrated feed] // Innovations in agriculture: problems and prospects. 2022. № 4(36). Pp. 14–24. EDN KSSZAW.

12. Vol'vak S.F., Pastuhov A.G., Baharev D.N., Dobrickij A.A. Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tehnologicheskikh processov i tehnicheskikh sredstv prigotovleniya kormov dlja sel'skhozajstvennykh zhivotnykh i pticy [Scientific foundations of improving technological processes and technical means of preparing feed for farm animals and poultry] : monograph. Belgorod : Belgorod State Agrarian University, 2022. 193 p. ISBN 978-5-6047966-8-9. EDN KJFAQR.

13. Vol'vak S.F., Shapovalov V.I., Nesterova N.V. Mnogokriterial'naja ocenka i vybor dozatorov dlja konstruktivno-tehnologicheskoy shemy malogabaritnogo mobil'nogo agregata dlja prigotovleniya kombikormov [Multicriteria assessment and selection of dispensers for the design and technological scheme of a small-sized mobile unit for the preparation of compound feeds] // Proceedings of the International Academy of Agrarian Education. 2015. № 24. Pp. 24–29. EDN UKIHXB.

14. Volvak S., Pastukhov A., Bakharev D., Dobrickiy A. Theoretical studies of technological process of grinding stalked feed // Engineering for Rural Development. Virtual, Jelgava, 2021. Pp. 831–836. DOI 10.22616/ERDev.2021.20.TF189. EDN VLJUQR.

15. Patent No. 2805301 C1 Russian Federation, IPC A23N 17/00. Kombikormovyy agregat [Compound feed unit] : № 2023112996 : application. 05/18/2023 : published. 10/13/2023 / S. F. Volvak, V. I. Shapovalov, D. N. Bakharev, A. A. Dobritsky; applicant Belgorod State Agrarian University. EDN RRFDDI.

16. Patent № 2853007 C1, Russian Federation, IPC A23N 17/00. Malogabaritnyy kombikormovyy agregat [Small-sized compound feed unit]: applied for 09.01.2025 : published on 17.12.2025 / S. F. Volvak, V. I. Shapovalov, A. G. Pastukhov, D. N. Bakharev ; applicant Belgorod State Agricultural University. EDN HWLPDG.

17. Volvak S.F., Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Koshchaev I.A. Obosnovanie konstrukcii barabannogo dozatora malogabaritnogo kombikormovogo agregata [Substantiation of the design of the drum dispenser of a small-sized feed unit] // Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives. 2025. № 1(45). Pp. 14–24. EDN NBIGLJ.
18. Ehksperimental'naya otrabotka kak ehlement sistemy upravleniya kachestvom [Experimental testing as an element of the quality management system]. URL: <https://oobskspetsavia.ru/2015/11/05/eksperimentalnaya-otrabotka-kak-element-sistemy-upravleniya-kachestvom/>.
19. Perednya V.I., Romanovich A.A. Ehksperimental'nye issledovaniya oborudovaniya dlya proizvodstva legkousvoyae-mogo zhidkogo korma dlya svinej [Experimental studies of equipment for the production of easily digestible liquid feed for pigs] // Equipment and technologies in animal husbandry. 2021. № 3(43). Pp. 54–61. DOI 10.51794/27132064-2021-3-54. EDN TCKHBV.
20. Pakhomov V.I., Rudoy D.V., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Olshevskaya A.V. Tehnologii i oborudovanie dlya proizvodstva kombikormov i premiksov [Technologies and equipment for the production of compound feeds and premixes]: Text-book. Rostov-on-Don: DSTU, 2019. 228 p.
21. Shkondin V.N. Razrabotka sposoba izmel'cheniya kormovogo zerna i obosnovanie parametrov dvuhstupenchatogo izmel'chitelya [Development of a method for grinding fodder grain and justification of the parameters of a two-stage grinder] : dis. ... cand. tech. sciences. Zernograd, 2018. 173 p. URL: <https://aagraa.pb/files/sovett/Shkondin/dissShkondin.pdf>.
22. Tehnologiya obrabotki pishchevyh othodov, kormov zhivotnogo proishozhdeniya i prigotovleniya kormovyh smesey [Technology of processing food waste, animal feed, and preparation of feed mixtures]. URL: <https://gcagro.ru/klientam/poleznye-stati/tehnologiya-obrabotki-pishchevyh-othodov-kormov-zhivotnogo-proishozhdeniya-i-prigotovleniya-kormovyh-smesey.html>.
23. Al-Maidi A.A.H., Himoud M.S., Kaliganov A.C. [et al.] Modelling the quality of the mixture in a continuous paddle mixer // International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. 2021. Vol. 16. Pp. 1769–1774. EDN NIZZWM.
24. Sabirov B.M., Ziganshin B.G., Dmitriev A.V., Nafikov I.R., Sabirova R.R. Issledovanie ustroystva dlya drobleniya zerna [Research of a device for grain crushing] // Bulletin of the Kazan State Agrarian University]. 2023. Vol. 18. № 1(69). Pp. 75–79. DOI 10.12737/2073-0462-2023-73-77. EDN JVHYQP.
25. Khaliullin D., Badretidinov I., Naficov I., Lukmanov R. Theoretical justification of design and technological parameters of hulling machine main working bodies // Engineering for Rural Development. Virtual, Jelgava, 2021. Pp. 1501–1506. DOI 10.22616/ERDev.2021.20.TF321. EDN CAUCPH.
26. Storozhuk T.A. Optimizatsiya processa smeshivaniya kormov [Optimization of the feed mixing process] // Politematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2019. № 148. Pp. 31–39. DOI 10.21515/1990-4665-148-003. EDN ZQZHYT.
27. Pastukhov A.G., Baharev D.N., Vol'vak S.F., Dobrickij A.A. Opredelenie koefitsienta Puassona i modul'ja Junga vneshnej plodovoj obolochki zerna kukuruzy [Determination of the poisson's ratio and young's modulus of the outer fruit shell of corn grain] // Agricultural machinery and technology. 2022. Vol. 16. № 3. Pp. 20–26. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN KUELTH.
28. Shapovalov V.I., Volvak S.F., Kondrashina V.E., Chugunova O.A. Nekotorye rezul'taty ispytaniy malogabaritnogo universal'nogo, mobil'nogo izmel'chitelya-smesitelya kormov dlya fermerov i lichnyh podsobnykh hozyajstv [Some results of testing a small-sized universal, mobile feed grinder-mixer for farmers and private households] // Materials of the reporting scientific and technical conference of LSAI employees on the results of 1991. Lugansk : LCNTI, 1992. Pp. 97. EDN XCBFDP.
29. Volvak S.F. Obosnovanie tehnologicheskogo processa i parametrov rabochih organov gibkogo universal'nogo malogabaritnogo kormoprigotovitel'nogo agregata v variante izmel'cheniya grubyyh kormov [Substantiation of the technological process and parameters of the working bodies of a flexible universal small-sized feed preparation unit in the option of grinding roughage] : dis. ... cand. tech. sciences. Lugansk, 1998. 244 p. EDN UKSZUV.
30. Shapovalov V.I., Bolotashvili Z.U., Volvak S.F. Obosnovanie potrebnoy proizvoditel'nosti malogabaritnogo izmel'chitelya zernovykh produktov [Substantiation of the required productivity of a small-sized grain product grinder] // Collection of scientific works of the Luhansk State Agrarian University : Technical Sciences. 2000. № 6/17. Pp. 43–45. EDN WQQFFZ.
31. Bolotashvili Z.U. Obosnovanie tehnologicheskogo processa izmel'cheniya i parametrov rabochih organov universal'nogo malogabaritnogo izmel'chitelya zernovykh produktov [Substantiation of the technological process of grinding and parameters of the working bodies of a universal small-sized grain product grinder] : abstract of dis. ... cand. tech. Sciences. Lugansk, 2000. 20 p. EDN ZLUOSV.
32. Shapovalov V.I., Bolotashvili Z.U., Volvak S.F., Lysenko I.B. Razrabotka gibkikh sistem – ehffektivnyj put' mehanizatsii sel'skohozyajstvennogo proizvodstva [Development of flexible systems – an effective way of mechanization of agricultural production] // Bulletin of the East Ukrainian State University. 1996. № 1. Pp. 169–173. EDN YGTOKV.
33. Kuzmin V.V. Parametry i rezhimy raboty kombinirovannogo agregata dlya gladkoj vspashki pod zernovye kolosovye kul'tury [Parameters and operating modes of a combined unit for smooth ploughing for cereal grain crops] : dis. ... cand. tech. sciences. Krasnodar, 2024. 164 p. URL: <https://kubsau.ru/upload/iblock/3ba/shcxg2rb712g70bcm89zl49py8nmbabw.pdf>.
34. Truflyak E.V., Truflyak I.S., Kravchenko V.S., Goncharova I.A. Metodika vybora kolichestva povtornostej pri provedenii ehksperimental'nykh issledovaniy [Methodology for choosing the number of repetitions in experimental research] // Politematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2008. № 38. Pp. 1–6. EDN JWXWTT.

Сведения об авторах

Вольвак Сергей Федорович, кандидат технических наук, профессор, профессор инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: volvak.s@yandex.ru.

Information about author

Volvak Sergey Fedorovich, candidate of technical sciences, professor, professor of the faculty of engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», str. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, e-mail: volvak.s@yandex.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ФИЛАМЕНТА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПУЛЛСТРУЗИИ ИЗ PET-ТАРЫ

Аннотация. Совершенствование производственных технологий и разработка новых материалов для применения в производстве запасных частей сельскохозяйственной техники несут в себе не только возможности развития экономики, машиностроения и повышения экологичности, но и возможные риски для здоровья человека. Полиэтилентерефталат (PET) широко используется в мировой промышленности, чем обуславливает значительный масштаб образования отходов данного полимера. Различные методы рециклинга PET-отходов позволяют создать ресурсную базу для применения в изготовлении запасных деталей сельскохозяйственной техники. В работе проведено исследование, цель которого состоит в определении уровня воздействия вредных факторов по показателю токсичности продуктов горения филамента для 3D-печати, полученного методом пуллструзии из PET-тары. Испытания проведены в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 12.1.044-2018. Проведена валидация методики испытаний с учетом технологических условий для определения показателя токсичности во время производства методом пуллструзии при температуре сопла 250 °C и оценки факторов риска для здоровья человека. Во время испытаний измерены показатели концентраций угарного газа (CO), углекислого газа (CO₂) и кислорода (O₂) в экспозиционной камере установки. Значение показателя токсичности продуктов горения установлено экспериментально-расчетным методом с учетом средних смертельных концентраций газов при изолированном воздействии в течение 30 мин, массы испытуемого материала и объема экспозиционной камеры. Полученные данные позволяют провести комплексную оценку риска для жизни и здоровья человека, классифицировать материал по степени опасности, разработать необходимые меры безопасности и требования к оснащению средствами индивидуальной защиты для производственного персонала.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, рециклинг, филамент, токсичность продуктов горения полимерных материалов, PET-пластик, 3D-печать, экология.

DETERMINATION OF THE TOXICITY OF 3D-PRINTING FILAMENT COMBUSTION PRODUCTS OBTAINED BY THE PULLSTRUSION METHOD FROM PET-CONTAINERS

Abstract. The improvement of production technologies and the development of new materials for use in the production of spare parts for agricultural machinery carry not only opportunities for economic development, mechanical engineering and environmental friendliness, but also possible risks to human health. Polyethylene terephthalate (PET) is widely used in the global industry, which leads to a significant scale of waste generation of this polymer. Various methods of PET-waste recycling make it possible to create a resource base for use in the manufacture of spare parts for agricultural machinery. The study aims to determine the level of exposure to harmful factors based on the toxicity of the combustion products of 3D-printed filament obtained by the pullstrusion method from PET containers. The tests were carried out in accordance with the methodology set out in GOST 12.1.044-2018. Validation of the test procedure for technological conditions was carried out to determine the toxicity index during production by pullstrusion at a nozzle temperature of 250 °C and to assess risk factors for human health. During the tests, the concentrations of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) in the exposure chamber of the installation were measured. The value of the toxicity index of combustion products was established by an experimental and calculation method, taking into account the average lethal concentrations of gases during isolated exposure for 30 minutes, the mass of the test material and the volume of the exposure chamber. The data obtained make it possible to carry out a comprehensive risk assessment for human life and health, classify the material according to the degree of danger, develop the necessary safety measures and requirements for equipping personal protective equipment for production personnel.

Keywords: agricultural machinery, recycling, filament, toxicity of combustion products of polymer materials, PET-plastic, 3D-printing, ecology.

Введение. С развитием сельскохозяйственной техники растет количество применяемых для ее производства технологий и материалов. В современной сельскохозяйственной технике доля компонентов, изготовленных из пластика, может составлять до 20 % от общей массы конструкции. С 2023 года в Российской Федерации существует требование по обязательной доле вторичного сырья в новой технике (более 10 %) [1], что стимулирует внедрение переработанных полимеров в производство новых машин [2].

Государство поддерживает отрасль переработки вторсырья, например, в рамках национального проекта «Экология» предусматривались субсидии на оборудование для переработки полимеров для использования в агропромышленном комплексе [3-5].

Совершенствование технологий переработки пластика становится особенно актуальным для снижения воздействия на окружающую среду, а также экономии материальных ресурсов [6]. Однако важной проблемой в контексте эксплуатации деталей, изготовленных из различных видов пластика для применения в сельскохозяйственной технике, является безопасность использования таких материалов.

Для применения деталей, изготовленных из переработанного PET-сырья, следует рассмотреть их влияние на здоровье человека и окружающую среду.

Согласно данным за последние несколько лет в России, как и во всем мире наблюдается активный рост объемов производства пластмасс. По некоторым прогнозам, через 10 лет рынок пластмасс вырастет до 24 млрд долларов США [7-9].

Наращивание объемов производства пластика неизбежно ведет к увеличению загрязнения окружающей среды. Период разложения пластиковых отходов в естественных условиях составляет сотни лет, что подтверждается существованием Большого тихоокеанского мусорного пятна – крупнейшего скопления морского мусора в северной части Тихого океана.

Основу этого скопления формируют разнообразные пластиковые отходы. Переработка пластиковых материалов стала важнейшей экологической задачей в современном обществе [10].

Риски для здоровья человека также связаны с токсичными компонентами, содержащимися в пластике. При определенных условиях разные виды пластика могут выделять опасные вещества, такие как формальдегид, стирол, фталаты и тяжелые металлы. Они могут оказывать негативное воздействие на нервную, репродуктивную и эндокринную системы, а также выделять канцерогенные диоксины при сжигании [11, 12].

Определение показателя токсичности продуктов горения филамента, изготовленного из PET-отходов – это критически важный этап обеспечения экологической безопасности и защиты здоровья человека. Внедрение новых технологий переработки пластиковых отходов снижает негативное воздействие человека на окружающую среду, но требует строгого контроля выбросов токсичных веществ на всех этапах производственного процесса. Рост объемов пластиковых отходов и расширение сферы применения, вторично переработанного PET, усиливают актуальность проблемы: при недостаточном контроле это повышает риски воздействия токсичных продуктов горения на экосистемы и здоровье населения.

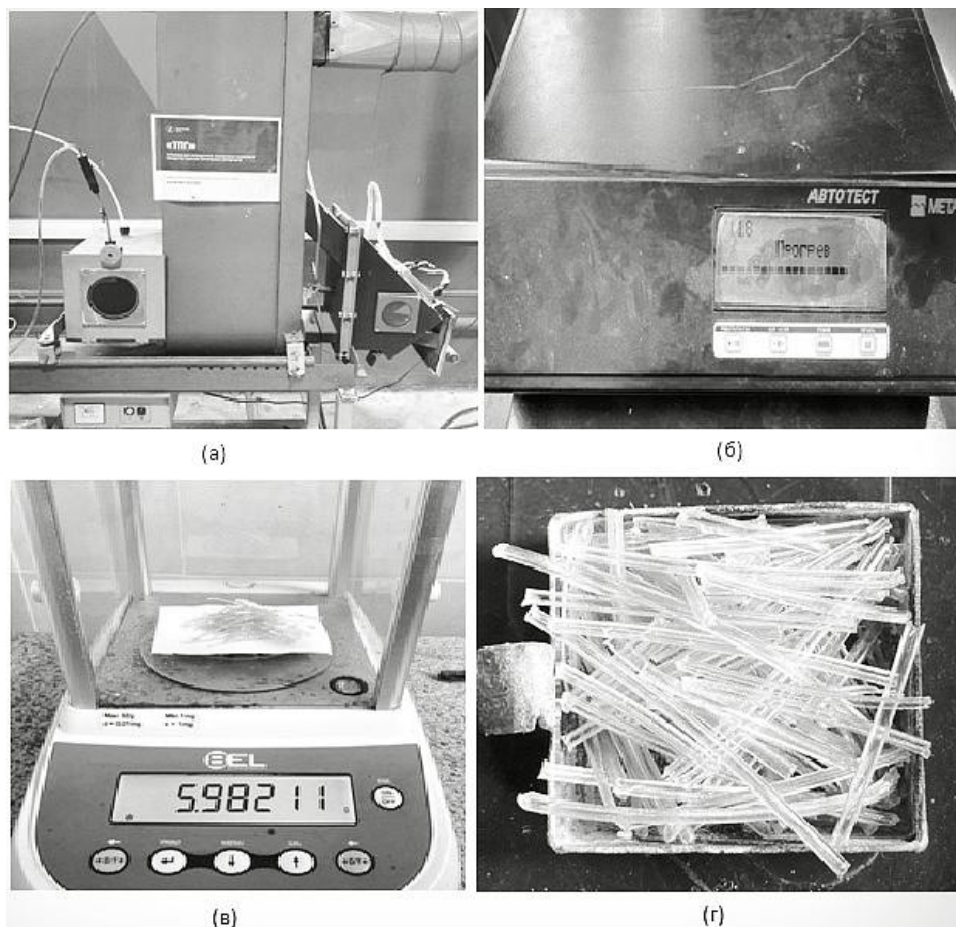
На текущий момент для 3D-печати одним из самых востребованных термопластиков является PETG [13, 14]. Исходным сырьем для него выступают гранулы пластика PET. В процессе производства PETG замещается циклогександиметанолом часть этиленгликоля (около 45 %, в зависимости от технических условий и вида продукции). PETG-пластик, в сравнении с PET, отличается аморфной структурой, что проявляется в его свойствах: он демонстрирует меньшую усадку и имеет повышенную ударную вязкость [15]. Несмотря на преимущества PETG, PET-пластик находит широкое применение в ряде сфер ввиду экономических и технологических преимуществ.

Применение переработанного PET-пластика является экономически и экологически выгодной альтернативой первичному материалу, при этом физико-механические свойства остаются достаточными для технического применения, а в ряде случаев могут быть улучшены за счет добавления модификаторов.

Цель исследования – экспериментальное определение показателя токсичности продуктов горения филамента для 3D-печати, полученного методом пуллструзии из PET-тары.

Материалы и методы. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 12.1.044-2018 и последующей валидацией методики экспериментального определения показателя (индекса) токсичности продуктов горения полимерных материалов на установке марки «ТПГ» [16]. Оборудование, использованное в ходе эксперимента, и испытуемый образец представлены на рисунке 1.

Экспериментальное определение показателя токсичности продуктов горения осуществлялось с использованием экспозиционной камеры, конструкция которой предусматривает две секции – подвижную и неподвижную. По периметру камеры выполнен паз для размещения надувной резиновой прокладки: она обеспечивает герметичное соединение секций и позволяет перемещать подвижную часть, регулируя тем самым объем рабочей зоны. Диапазон регулировки объема камеры составляет от 0,1 до 0,2 м³. В рамках исследования установлен фиксированный объем камеры 0,138 м³, обеспечивающий оптимальные условия для оценки токсикологических характеристик выделяемых продуктов горения.



а) установка марки «ТПГ»; б) газоанализатор многокомпонентный «Авто-тест-02-02»;
 в) весы неавтоматического действия DA-65C с подготовленным образцом; г) образец в испытательной лодочке

Рис. 1 – Оборудование, использованное для проведения испытаний

Для непрерывного мониторинга состава газовой среды в объеме экспозиционной камеры применялся многокомпонентный газоанализатор «Авто-тест-02-02». Прибор обеспечивал оперативный контроль концентраций следующих компонентов: оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO₂) и кислорода (O₂).

Регистрация показателей выполнялась в режиме реального времени, что позволило зафиксировать динамику изменения концентраций токсичных газов и кислорода на протяжении всего эксперимента.

Временной параметр экспозиции контролировался посредством секундомера. Общая продолжительность каждого испытания составляла 30 мин, что соответствует типовым протоколам токсикологических испытаний и обеспечивает достаточный период для формирования репрезентативной картины воздействия газообразных продуктов горения.

Испытания проводились в условиях, близких к стандартным (нормальная температура и давление, отсутствие принудительной вентиляции и внешних возмущающих факторов).

Определение показателя токсичности продуктов горения выполнялось путем установления зависимости между массой испытуемого образца и теоретическим летальным эффектом выделяемых газообразных компонентов с учетом объема экспозиционной камеры.

Результаты исследований и их обсуждение. Согласно методике проведения испытаний, необходимо было подвергнуть образцы ПЕТ-пластика воздействию теплового потока различной плотности с шагом на повышение температуры в 50 °C и найти значение температуры для материала, при котором происходит термоокислительное разложение (тление). Это значение должно быть на 50 °C ниже температуры самовоспламенения испытуемого образца.

В ходе подготовительного этапа исследования осуществлен подбор режимов испытаний образцов филамента (таблица 1), изготовленного методом пуллстрики из переработанных ПЕТ-отходов. Оптимизация параметров проводилась с учетом физико-механических характеристик материала и требований нормативной документации.

Таблица 1 – Подбор режима термоокислительного разложения и самовоспламенения филамента

Номер образца	Размеры образца, мм	Температура испытания (плотность теплового потока), °C (кВт/м ²)	Самовоспламенение	Начальная масса образца, m ₀ , г
1	40x40x9	300 (10,0)	Нет	5,98
2	40x40x9	350 (13,5)	Нет	6,01
3	40x40x9	400 (18,0)	Нет	6,02
4	40x40x9	450 (23,0)	Нет	5,99
5	40x40x9	500 (28,0)	Да	5,97

На основании проведенного исследования был выбран режим термоокислительного разложения при плотности теплового потока 23,0 кВт/м², обеспечивающий стабильное протекание процесса без перехода в стадию пламенного горения.

Результаты процентного определения концентраций компонентов газовой среды (CO, CO₂, O₂) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Состав газовой среды

Номер образца	Размеры образца, мм	Температура испытания (плотность теплового потока), °C (кВт/м ²)	Время термического разложения образца, мин	Начальная масса образца, m ₀ , г	Масса образца после испытания, г	Концентрация, %		
						CO	CO ₂	O ₂
6	40x40x9	450 (23,0) «тление»	21	6,08	0,43	0,45	0,94	19,62
7	40x40x9	500 (28,0) «горение»	19	6,12	0,55	0,32	2,02	18,01

Для последующих расчетов полученные в ходе испытаний концентрации газов были приведены к значениям в мг/м³ при стандартных условиях согласно выражению:

$$C_{ppm} = 10000 C_{\%}, \quad (1)$$

где C_{ppm} – концентрация вещества в газе, выраженная в ppm (parts per million, «частей на миллион»); $C_{\%}$ – концентрация вещества в газе, выраженная в процентах объемной доли.

Выполним перерасчет ppm в мг/м³ по формуле:

$$C_{мг/м^3} = \frac{C_{ppm} M}{V_m}, \quad (2)$$

где $C_{мг/м^3}$ – массовая концентрация вещества в газе, выраженная в мг/м³; M – молярная масса рассчитываемого газа; V_m – молярный объем газа, принимаемый $V_m = 24,45$ л/моль.

Рассчитанные значения массовых концентраций CO и CO₂ в газе при режимах тления и горения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения массовых концентраций CO и CO₂ в газе при режимах тления и горения

Температура испытания (плотность теплового потока), °C (кВт/м ²)	Массовая концентрация CO, мг/м ³	Массовая концентрация CO ₂ , мг/м ³
450 (23,0) тление	5241,2	17204,66
500 (28,0) горение	3727,2	36971,72

В соответствии с методикой определения показателя токсичности продуктов горения материалов экспериментально-расчетным методом [17] проведем расчет индекса токсичности K_m :

$$K_m = \frac{C_{CO}}{CL_{50CO}} + \frac{C_{CO_2}}{CL_{50CO_2}}, \quad (3)$$

где C_{CO} , C_{CO_2} – массовые концентрации опасных газов, полученных при испытании, мг/м³; CL_{50CO} , CL_{50CO_2} – средние смертельные концентрации газов при изолированном 30-минутном воздействии, принятые равными 4600 и 800000 соответственно, мг/м³.

Тогда значение показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов $H_{CL_{50}}$, г/м³ составит:

$$H_{CL_{50}} = \frac{m_0}{K_m V_k}, \quad (4)$$

где m_0 – масса образца до испытания, г; V_k – внутренний объем установки при испытании, м³.

Значение $H_{CL_{50}}$, вычисленное из приведенных формул, составило 37,95 г/м³ для режима термоокислительного разложения (тления), и 51,78 г/м³ для режима горения. За окончательный результат принимаем значение $H_{CL_{50}}$, полученное для режима термоокислительного разложения (тления), как наихудший результат. Согласно п. 2.16.2 ГОСТ 12.1.044-2018, значение $H_{CL_{50}}$ позволяет отнести филамент, изготовленный методом пуллструзии из PET-пластика, к категории высокоопасных материалов по показателю токсичности продуктов горения полимерных материалов.

Проведена валидация методики испытаний для технологических условий, необходимых для получения филамента методом пуллструзии. Условия проведения испытаний аналогичны тем, что представлены выше, за исключением увеличения размеров образца 80×80×20 мм для увеличения токсического воздействия и температуры в камере нагревания образца, значение которой должно составлять 250 °С. Данная температура достаточна для плавления пластика с последующим формированием в прутки при производстве. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Состав газовой среды при технологических условиях производства

Номер образца	Размеры образца, мм	Температура испытания (плотность теплового потока), °С (кВт/м ²)	Время термического разложения образца, мин	Начальная масса образца, m_0 , г	Масса образца после испытания, г	Концентрация, %		
						CO	CO ₂	O ₂
8	80×80×20	250 (8,0) «тление»	20	12,05	11,21	0,08	0,10	20,50

С использованием экспериментально-расчетного метода в соответствии с формулами (1–4) определен показатель токсичности продуктов горения исследуемых материалов. Полученное значение $H_{CL_{50}} = 433,56$ г/м³ указывает на минимальное токсическое воздействие веществ, выделяемых при горении.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что филамент, полученный методом пуллструзии из PET-отходов, характеризуется высоким показателем токсичности продуктов горения в условиях стандартного испытания. Однако при температурах, необходимых для технологического процесса формирования филамента, показатель токсичности снижается до минимального уровня.

Результаты проведенного исследования позволяют оценить риски для здоровья человека и фактор опасности для окружающей среды, и позволяет выработать подходы к снижению вреда, наносимых им.

Использование переработанного PET-пластика в рамках организации линии производства запасных частей для сельскохозяйственной техники с применением аддитивных технологий способствует рациональному использованию материальных ресурсов и минимизации экологического ущерба за счет рециклинга потенциально опасных отходов.

Библиография

1. Распоряжение Правительства РФ от 2 августа 2023 г. N 2094-р «Об утверждении перечня видов продукции (товаров), производство которых осуществляется с использованием определенной доли вторичного сырья в их составе и в отношении которых осуществляется стимулирование деятельности по их производству и перечня видов работ, услуг, выполнение и оказание которых осуществляется с использованием определенной доли вторичного сырья в их составе и в отношении которых осуществляется стимулирование деятельности по их выполнению». <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407381005/>.
2. Шимохин А.В., Союнов А.С., Биткина Е.Е., Янковский К.А. К вопросу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 357–365. DOI 10.17816/0321-4443-111103.
3. Паспорт национального проекта «Экология» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24 декабря 2018 г. №16). https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_316096/.
4. Любарская М.А., Киктенко А.В. Использование потенциала федеральных и региональных проектов для развития переработки пластика в России // Экономический вектор. 2023. № 4(35). С. 65–68. DOI: 10.36807/2411-7269-2023-4-35-65-68.
5. Муравский А.А., Аликин М.Б., Дворко И.М., Лавров Н.А. Полимерная 3D-печать: история, классификация и современные тенденции развития (обзор) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. № 64(90). С. 58–66. DOI: 10.36807/1998-9849-2023-64-90-58-66.
6. Ветрова М.А., Яруллина И.Э., Богданова А.А. Стратегия развития отрасли утилизации ПЭТ-упаковки в условиях цифровой трансформации // Креативная экономика. 2022. Том 16, № 7. С. 2769–2794. DOI: 10.18334/ce.16.7.114884.
7. Голованова С.В., Креховец Е.В. Потенциал развития российского производства пластиков на фоне санкций: оценка на среднесрочную перспективу // Проблемы прогнозирования. 2024. № 2. С. 165–177. DOI: 10.47711/0868-6351-203-165-177.
8. Самоделкин С.И., Фомичев А.Н. Тенденции мирового экспорта пластика и полимерной продукции // Вестник Академии знаний. 2024. № 1(60). С. 293–298.
9. Капустин Н.О., Грушевенко Д.А. Оценка долгосрочных перспектив спроса на рынке пластиков в условиях трансформации отрасли // Проблемы прогнозирования. 2023. № 2. С. 126–140. DOI: 10.47711/0868-6351-197-126-140.

10. Казак Е.С., Филимонова Е.А., Преображенская А.Е. Микро- и нанопластик в природных водах России и проблемы его определения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 110–123.
11. Соколов Ю.И. Риски тотального пластикового загрязнения планеты // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17, № 3. С. 30–43. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-3-30-43>.
12. Кизеев А.Н., Сюрин С.А. Пластик в биосфере – риски биоте и здоровью населения России // Здоровье населения и среда обитания. 2023. Т. 31, № 5. С. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-5-41-51>.
13. Кащевский А.А., Кузнецов Ю.А. Перспективы применения аддитивных технологий в изготовлении деталей сельскохозяйственной техники // Состояние и инновации технического сервиса конструкций, машин и оборудования. Новосибирск : ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2024. С. 108–111.
14. Трошин А.А., Захаров О.В. Обзор технологических возможностей FDM-3d принтеров // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 1(28). С. 61–65.
15. Вдовенко А.Д., Никитенко М.С., Пимонов М.В., Сивушкин А.С. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров FDM-печати на механические свойства полимерных образцов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5(171). С. 42–50. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-42-50.
16. Пузач С.В., Комаревцев Н.В., Акперов Р.Г. Сравнительный анализ нового экспериментально-теоретического подхода и нормативных методов определения токсичности продуктов горения полимерных материалов // Пожарная, экологическая и техносферная безопасность. 2024. № 4. С. 36–45. DOI: 10.25257/FE.2024.4.36-45.
17. Иличкин В.С., Смирнов Н.В., Елисеев Ю.Н., Белоусов Ю.Ю., Зайцев А.А., Комова М.А. Определение показателя токсичности продуктов горения материалов экспериментально-расчетным методом // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14, № 3. С. 29–34.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 2 avgusta 2023 g. N 2094-r «Ob utverzhdenii perechnya vidov produktsii (tovarov), proizvodstvo kotorykh osushchestvlyayetsya s ispol'zovaniem opredelennoy doli vtorichnogo syr'ya v ikh sostave i v otnoshenii kotorykh osushchestvlyayetsya stimulirovanie deyatel'nosti po ikh proizvodstvu i perechnya vidov rabot, uslug, vypolnenie i okazanie kotorykh osushchestvlyayetsya s ispol'zovaniem opredelennoy doli vtorichnogo syr'ya v ikh sostave i v otnoshenii kotorykh osushchestvlyayetsya stimulirovanie deyatel'nosti po ikh vypolneniyu» [Order of the Government of the Russian Federation dated August 2, 2023, No. 2094-r «On approval of the list of types of products (goods) that are produced using a certain proportion of secondary raw materials and for which the production activity is encouraged, as well as the list of types of works and services that are performed and provided using a certain proportion of secondary raw materials and for which the performance activity is encouraged»]. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407381005/>
2. Shimokhin A.V., Soyunov A.S., Bitkina E.E., Yankovsky K.A. K voprosu o primenении additivnoy tekhnologii na predpriyatiyakh sel'skokhozyaystvennogo mashinostroyeniya [On applicability of additive technology at agricultural engineering enterprises]. Traktory i sel'khoz mashiny. 2022. T. 89. № 5. S. 357–365. DOI 10.17816/0321-4443-111103.
3. Pasport natsional'nogo proekta «Ekologiya» (utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente RF po strategicheskemu razvitiyu i natsional'nym proektam, protokol ot 24 dekabrya 2018 g. №16). [Passport of the National Project «Ecology2 (approved by the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National Projects, Minutes № 16 dated December 24, 2018)]. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_316096/
4. Lyubarskaya M.A., Kiktenko A.V. Ispol'zovanie potentsiala federal'nykh i regional'nykh proektov dlya razvitiya pererabotki plastika v Rossii [Using the potential of federal and regional projects to develop plastic recycling in Russia] // Ekonomicheskii vektor. 2023. № 4(35). S. 65–68. DOI: 10.36807/2411-7269-2023-4-35-65-68.
5. Muravskiy A.A., Alikin M.B., Dvorko I.M., Lavrov N.A. Polimernaya 3D-pechat': istoriya, klassifikatsiya i sovremennye tendentsii razvitiya (obzor) [Polymer 3D printing: history, classification and current development trends (review)] // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta). 2023. № 64(90). S. 58–66. DOI: 10.36807/1998-9849-2023-64-90-58-66.
6. Vetrova M.A., Yarullina I.E., Bogdanova A.A. Strategiya razvitiya otrasli utilizatsii PET-upakovki v usloviyakh tsifrovoy transformatsii [Development strategy for PET packaging recycling industry amidst digital transformation] // Kreativnaya ekonomika. 2022. Tom 16, № 7. S. 2769–2794. DOI: 10.18334/ce.16.7.114884.
7. Golovanova S.V., Krekhovets E.V. Potentsial razvitiya rossiiskogo proizvodstva plastikov na fone sanktsii: otsenka na srednesrochnuiy perspektivu [Potential for the development of russian plastic production against the backdrop of sanctions: assessment for the medium term] // Problemy prognozirovaniya. 2024. № 2. S. 165–177. DOI: 10.47711/0868-6351-203-165-177.
8. Samodelkin S.I., Fomichev A.N. Tendentsii mirovogo eksporta plastika i polimernoi produktsii [Trends in global export of plastic and polymer products] // Vestnik Akademii znaniy. 2024. № 1(60). S. 293–298.
9. Kapustin N.O., Grushevenko D.A. Otsenka dolgosrochnykh perspektiv sprosa na rynke plastikov v usloviyakh transformatsii otrasli [Assessment of long-term prospects for demand in the plastics market in the face of industry transformation] // Problemy prognozirovaniya. 2023. № 2. S. 126–140. DOI: 10.47711/0868-6351-197-126-140.
10. Kazak E.S., Filimonova E.A., Preobrazhenskaya A.E. Mikro- i nanoplastik v prirodnykh vodakh Rossii i problem ego opredeleniya [Micro- and nanoplastics pollution in the aquatic environments in Russia and detection problems] // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya. 2022. № 6. S. 110–123.
11. Sokolov Yu.I. Riski total'nogo plastikovogo zagryazneniya planet [Risks of total plastic pollution of the planet] // Problemy analiza riska. 2020. T. 17, № 3. S. 30–43. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-3-30-43>.
12. Kizeev A.N., Syurin S.A. Plastik v biosfere – riski biote i zdorov'yu naseleniya Rossii [Plastic in the biosphere - risks to biota and human health in Russia] // Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya. 2023. T. 31, № 5. S. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-5-41-51>.
13. Kashchevskiy A.A., Kuznetsov Yu.A. Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologiy v izgotovlenii detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Prospects for the use of additive technologies in the production of agricultural machinery parts] // Sostoyanie i innovatsii tekhnicheskogo servisa konstruktsey, mashin i oborudovaniya. Novosibirsk : ITS NGAU «Zolotoy kolos», 2024. S. 108–111.
14. Troshin A.A., Zakharov O.V. Obzor tekhnologicheskikh vozmozhnostey FDM-3D printerov [Overview of the technological capabilities of fdm-3d printers] // Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. 2020. № 1(28). S. 61–65.

15. Vdovenko A.D., Nikitenko M.S., Pimonov M.V., Sivushkin A.S. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov FDM-pechati na mekhanicheskie svoystva polimernykh obraztsov [Experimental investigation of FDM printing parameters on polymer specimen mechanical properties] // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2025. № 5(171). S. 42–50. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-42-50.

16. Puzach S.V., Komarevtsev N.V., Akperov R.G. Sravnitel'nyy analiz novogo eksperimental'no-teoreticheskogo podkhoda i normativnykh metodov opredeleniya toksichnosti produktov goreniya polimernykh materialov [Comparative analysis of a new experimental-theoretical approach and regulatory methods for determining the toxicity of combustion products of polymeric materials] // Pozharnaya, ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost. 2024. № 4. S. 36–45. DOI: 10.25257/FE.2024.4.36-45.

17. Ilichkin V.S., Smirnov N.V., Eliseev Yu.N., Belousov Yu.Yu., Zaitsev A.A., Komova M.A. Opredelenie pokazatelya toksichnosti produktov goreniya materialov eksperimental'no-raschetnym metodom [Determination of the toxicity index of combustion products of materials by experimental and computational methods] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2005. T. 14, № 3. S. 29–34.

Сведения об авторах

Кашчевский Андрей Андреевич, аспирант кафедры надежности и ремонта машин, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, Россия, 302019, тел. +7 (953) 811-62-47, e-mail: kashcevsky.A@yandex.ru;

Кузнецов Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры надежности и ремонта машин, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, Россия, 302019, тел.: + 7 (920) 828-92-19, e-mail: kentury@yandex.ru;

Бережина Наталья Александровна, доктор технических наук, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, профессор кафедры земледелия, селекции и растениеводства, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, Россия, 302019, тел.: +7 (4862) 43-19-81, e-mail: jrdan@yandex.ru;

Кравченко Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127434, тел.: + 7 (916) 242-78-86, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru.

Information about authors

Kashchevsky Andrey Andreevich, graduate student of the department of machine reliability and repair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin», General Rodin St., 69, Orel, Russia, 302019, tel. +7 (953) 811-62-47, e-mail: kashcevsky.A@yandex.ru;

Kuznetsov Yury Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reliability and Repair of Machines, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin», General Rodin St., 69, Orel, Russia, 302019, tel. +7 (920) 828-92-219, e-mail: kentury@yandex.ru;

Berezina Natalya Aleksandrovna, doctor of technical sciences, vice-rector for digitalization, research, and innovation, professor in the department of agriculture, breeding and crop production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin», General Rodin St., 69, Orel, Russia, 302019, tel. +7 (4862) 43-19-81, e-mail: jrdan@yandex.ru;

Kravchenko Igor Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor department of technical service of machines and equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya St., 49, Moscow, Russia, 127434, tel.: + 7 (916) 242-78-86, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРООЗОНИРОВАНИЯ НА ЗЕЛЕННЫЕ ОДНОКЛЕТОЧНЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ ШТАММА *CHLORELLA VULGARIS* ИФР № С-111 ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

Аннотация. В текущих реалиях российского агропромышленного комплекса наиболее приоритетными являются задачи, связанные с импортозамещением и ростом продуктивности животноводства путём внедрения кормовых добавок, отличающихся высоким качеством. Особый интерес среди таких добавок вызывает суспензия микроводоросли хлореллы (*Chlorella vulgaris*) – ценный источник полноценного белка, незаменимых аминокислот, витаминов и биостимулирующих веществ. Но одной из причин, не позволяющих вывести промышленное культивирование хлореллы на новый уровень, является значительная энергоёмкость известных классических технологий. Известные на данный момент традиционные подходы интенсификации роста хлореллы характеризуются недостаточной эффективностью и риском накопления токсичных веществ, что уменьшает экологичную безопасность конечной продукции, т.е. оптимизация состава питательных сред, термическое воздействие и химическая стимуляция соединениями марганца, нитратом аммония или диоксидом углерода (CO₂) не дают ожидаемую результативность. Всё это обуславливает необходимость решения данной научно-практической задачи путём перехода к современным электротехнологиям, сочетающим высокую энергоэффективность и экологическую безопасность с сокращением производственных издержек. В этом ключе перспективным решением видится использование электроозонатора. Экспериментальная часть исследования выполнена в условиях лабораторий РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева и производственных мощностей ИП Трифонов А.В. Эксперимент заключался в оценке эффективности воздействия озонозовоздушной смеси на динамику роста и физиологическое состояние клеток хлореллы в зависимости от концентрации озона и продолжительности обработки. Для детализации влияния озонозовоздушной смеси на клетки *Chlorella vulgaris* был реализован полнофакторный эксперимент. Полученные результаты исследований обрабатываются с помощью методов математической статистики в программе «STATISTICA 6.0». Обработка озонем в концентрации 7,0 мг/м³ позволила получить наибольшее содержание клеток хлореллы. Превышение данной концентрации приводит к уменьшению оптической плотности и снижению биостимулирующего эффекта. Анализ результатов эксперимента позволяет оценить степень влияния каждого фактора на процесс стимулирования микроводоросли хлореллы.

Ключевые слова: электроозонирование, озонозовоздушная смесь, микроводоросли хлореллы, коэффициент регрессии, концентрации озона, оптическая плотность, раствор суспензии.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ELECTRO-OZONATION ON GREEN UNICELLULAR MICROALGAE OF THE STRAIN *CHLORELLA VULGARIS* IFR № C-111 FOR AGRICULTURAL PURPOSES

Abstract. In the current realities of the Russian agro-industrial complex, the tasks related to import substitution and the growth of livestock productivity through the introduction of high-quality feed products are of the highest priority. Of particular interest among such additives is chlorella vulgaris suspension, a valuable source of complete protein, essential amino acids, vitamins, and biostimulating substances. However, one of the reasons that makes it impossible to bring industrial chlorella cultivation to a new level is the significant energy intensity of well-known classical technologies. Currently known traditional approaches to chlorella growth intensification are characterized by insufficient efficiency and the risk of accumulation of toxic substances, which reduces the environmental safety of the final product, i.e. optimization of the composition of nutrient media, thermal effects and chemical stimulation with manganese compounds, ammonium nitrate or carbon dioxide (CO₂) do not give the expected results. All this makes it necessary to solve this scientific and practical problem by switching to modern electrical technologies that combine high energy efficiency and environmental safety with reduced production costs. In this regard, the use of an electric detonator is seen as a promising solution. The experimental part of the study was performed in the conditions of the laboratories of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev and the production facilities of IP Trifonov A.V. The experiment consisted in evaluating the effectiveness of the effect of an ozone-air mixture on the growth dynamics and physiological state of chlorella cells, depending on the concentration of ozone and the duration of treatment. To detail the effect of the ozone-air mixture on *Chlorella vulgaris* cells, a full-scale experiment was implemented. The obtained research results are processed using mathematical statistics methods in the STATISTIC 6.0 program. Ozone treatment at a concentration of 7.0 mg/m³ allowed to obtain the highest content of chlorella cells. Exceeding this concentration leads to a decrease in optical density and a decrease in the biostimulating effect. The analysis of the experimental results makes it possible to assess the degree of influence of each factor on the process of stimulating chlorella microalgae.

Keywords: electroozoning, ozone-air mixture, chlorella microalgae, regression coefficient, ozone concentrations, optical density, suspension solution.

Введение. В текущих реалиях российского агропромышленного комплекса наиболее приоритетными являются задачи, связанные с импортозамещением и ростом продуктивности животноводства путём внедрения кормовых добавок, отличающихся высоким качеством. Особый интерес среди таких добавок вызывает суспензия микроводоросли хлореллы (*Chlorella vulgaris*) – ценный источник полноценного белка, незаменимых аминокислот, витаминов и биостимулирующих веществ [1-3]. Но одной из причин, не позволяющих вывести промышленное культивирование хлореллы на новый уровень, является значительная энергоёмкость известных классических технологий. Известные на данный момент традиционные подходы интенсификации роста хлореллы характеризуются недостаточной эффективностью и риском накопления токсичных веществ, что уменьшает экологичную безопасность конечной продукции, т.е. оптимизация состава питательных сред, термическое воздействие и химическая стимуляция соединениями марганца, нитратом аммония или диоксидом углерода (CO₂) не дают ожидаемую результативность. Всё это обуславливает необходимость решения данной научно-практической

задачи путём перехода к современным электротехнологиям, сочетающим высокую энергоэффективность и экологическую безопасность с сокращением производственных издержек. В этом ключе перспективным решением видится использование электроозонатора. При помощи электроозонатора вырабатывается озоновоздушная смесь, используемая для обработки суспензии [4, 5, 7, 9, 11]. Известно, что озон – это мощный окислитель, быстро переходящий в молекулярный кислород и позволяющий при правильной подборке дозировки активизировать метаболизм микроводорослей. Но для реализации данной технологии на практике требуется выполнить научное обоснование параметров электроозонатора и режимов обработки, которые позволят обеспечить необходимую стимуляцию роста без снижения жизнеспособности клеток [6].

Методика проведения эксперимента. В ходе экспериментальных исследований использовалась специально спроектированная и изготовленная лабораторная установка, предназначенная для генерации озоновоздушной смеси и её дозированной подачи в среду культивирования микроводорослей. При разработке лабораторной установки основной акцент делался на возможность гибкого регулирования температуры, массовой доли озона в газовой фазе и избыточному давлению на выходе установки [6].

Конструктивно экспериментальная установка представляет собой модульную систему, объединённую в последовательную технологическую цепь. Устройство установки и последовательность соединений её элементов представлены на структурной схеме (рис. 1).

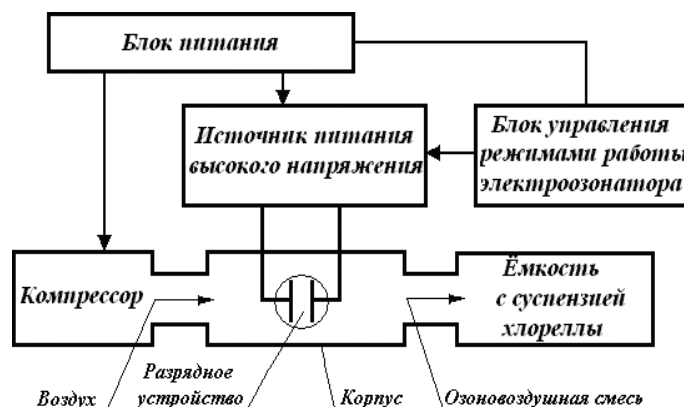


Рис. 1 – Структурная схема экспериментальной установки

Основу экспериментальной установки составляет герметичный электроозонатор с разрядным устройством, получающим питание от высоковольтного блока [5, 8, 15]. Источник питания высокого напряжения содержит полупроводниковый преобразователь частоты и повышающий трансформатор. Точное управление рабочими параметрами обеспечивается посредством задающего генератора в сочетании с усилителем мощности. Дополнительно культуральный контур содержит прозрачные ёмкости с суспензией хлореллы, газовые магистрали, изготовленные из таких химически инертных материалов, как силикон и фторопласт, и систему диффузоров для равномерного распределения озоновоздушной смеси в жидкости.

Производительность установки регулировалась путём изменения напряжения питания на разрядном промежутке. Применяемую экспериментальную установку откалибровали для получения установленных концентраций озона в воздушной смеси. Массовую долю озона определяли, применив один из высокоточных методов – йодометрический метод. Данный метод обеспечивает высокую точность в диапазоне от 0,4 % до 10⁻⁶ %.

Подсчёт численности клеток хлореллы выполнялся в двухсеточной камере Горяева применив световой (оптический) микроскоп. Исследование проводилось по унифицированной методике прямого микроскопического подсчёта. Протокол эксперимента включал в себя отбор и подготовку пробы суспензии, равномерное распределение образца в счётной камере, регистрация клеток в пяти больших квадратах сетки с последующим определением их среднего числа. Итоговое значение концентрации клеток определено по формуле (1). Параллельно при помощи фотоэлектроколориметра КФК-2 осуществлялся фотометрический контроль оптической плотности суспензии.

$$C_{хл} = \frac{1}{0,004 \cdot 10^{-3}} \cdot N_{кл} = N_{кл} \cdot 2,5 \cdot 10^5, \quad (1)$$

где $C_{хл}$ – искомая концентрация клеток в нативной суспензии *Chlorella vulgaris*, кл/мл; $N_{кл}$ – среднее число клеток, определённое в одном большом квадрате сетки, шт.

Исследование влияния озоновоздушной обработки на динамику роста микроводоросли CHLORELLA VULGARIS ИФР № С-111. Экспериментальная часть исследования выполнена в условиях лабораторий РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева и производственных мощностей ИП Трифонов А.В. Суть эксперимента заключалась в оценке эффективности воздействия озоновоздушной смеси на динамику роста и физиологическое состояние клеток хлореллы в зависимости от концентрации озона и продолжительности обработки. Первоначально выполнен предварительный эксперимент, целью которого является определение диапазона параметров, обеспечивающих эффективное стимулирующее воздействие на культуру микроводоросли. Получены следующие диапазоны параметров, оказывающие положительное влияние на клетки микроводоросли: концентрация озона C_{O_3} : 3,0–9,0 мг/м³; продолжительность обработки t : 4,0–10 мин.

Для детализации влияния озоновоздушной смеси на клетки *Chlorella vulgaris* был реализован полнофакторный эксперимент [1, 12]. Обработка полученных результатов осуществлялась с применением методов математической статистики, реализованных в программном комплексе «STATISTICA 6.0».

Для модели приняты три независимые переменные, каждая из которых варьируется на четырёх уровнях:

$x_1(t)$ – продолжительность обработки суспензии хлореллы озоновоздушной смесью, мин: 4; 6; 8; 10. Данный диапазон был определён в пределах зоны положительного отклика, выявленной в ходе однофакторного поискового эксперимента.

x_2 ($C[O_3]$) – концентрация озона в подаваемой озонозовоздушной смеси, mg/m^3 : 3,0; 5,0; 7,0; 9,0. Данный диапазон был определён аналогично, как и для фактора x_1 , т.е. в области экстремумов, установленных в ходе предварительного эксперимента.

x_3 (M) – кратность обработок клеток хлореллы озонозовоздушной смесью в рамках четырёхдневного цикла, раз: 1; 2; 3; 4. Указанные уровни определены исходя из биологических ритмов питания и деления клеток хлореллы, а также с учётом технологических особенностей её выращивания.

В соответствии с ТУ 9291-003-12001826-05 [13] в рамках исследования в роли независимых переменных рассмотрены следующие параметры: концентрация клеток в 1 мл неразбавленной суспензии (кл/мл); оптическая плотность суспензии ($D_{кл}$). Но в рамках данной работы для наглядности представленных данных в качестве основного интегрального показателя роста принята только оптическая плотность суспензии ($D_{кл}$).

Для того, чтобы определить степень влияния изучаемых факторов на оптическую плотность раствора суспензии хлореллы, был выполнен регрессионный анализ, данные для которого сведены в таблицу 1, и получена математическая модель в виде уравнения множественной регрессии (2), которое имеет вид:

$$D_{кл} = 1,05 + 0,48C_{o_3} - 0,22M + 0,37\tau C_{o_3} - 0,54\tau M + 0,29C_{o_3}M + 0,45C_{o_3}^2 - 0,25M^2 + 0,45C_{o_3}^3 - 0,2M^3. \quad (2)$$

Таблица 1 – Результаты регрессионного анализа для зависимой переменной оптическая плотность

	Коэффициент при переменной	Стандартная ошибка оценки	Сдвиги нестандартизованный коэффициент	Стандартная ошибка оценки св. члена	t(64)	p – уровень значимости
Сдвиг			1,050732	0,055983	17,43077	0,000000
τ	-0,045717	0,123517	-0,004310	0,011980	-0,26898	0,788032
$C[O_3]$	0,481337	0,123517	0,048215	0,013230	4,23424	0,000082
M	-0,223829	0,123517	-0,025084	0,013230	-1,98235	0,057009
$\tau C[O_3]$	0,373201	0,203714	0,010485	0,004989	1,84313	0,060216
τM	-0,543187	0,206871	-0,022360	0,008355	-2,82309	0,007500
$C[O_3] M$	0,298868	0,120937	0,009177	0,003420	2,50332	0,015234
τ^2	-0,030919	0,123517	-0,003380	0,013034	-0,26988	0,903031
$C[O_3]^2$	0,452488	0,123517	0,049215	0,013034	4,09825	0,000082
M^2	-0,254723	0,123517	-0,025085	0,013034	-1,96245	0,055078
τ^3	-0,029918	0,123517	-0,003380	0,013034	-0,25800	0,894031
$C[O_3]^3$	0,452487	0,123517	0,049215	0,013034	4,09825	0,000084
M^3	-0,204721	0,123517	-0,025085	0,013034	-1,96245	0,055073
$\tau C[O_3]$	-0,070688	0,12392	-0,000789	0,001317	-0,58363	0,597791
$R = 0,92, r^2 = 0,86, F(3,64)=6,4207, p < 0,00072$						

В ходе проведённого статического анализа установлена сильная корреляционная зависимость между оптической плотностью суспензии ($D_{кл}$) и комплексом изучаемых факторов. Множественный коэффициент корреляции R составляет 0,92. В свою очередь коэффициент детерминации R^2 составляет 0,86, это говорит о том, что 86 % изменчивости отклика объясняется совместным влиянием трёх переменных x_1, x_2, x_3 , а необъяснённая дисперсия ($1 - R^2$) обуславливается погрешностями измерений и неучтёнными параметрами. t-тестирование коэффициентов регрессии с использованием метода Стьюдента подтвердило влияние того или иного фактора на $D_{кл}$ при контроле постоянства остальных переменных.

Сдвиг определяет прогнозируемое значение $D_{кл}$, в том случае, если все переменные x равны 0 (в данном случае $a = 1,05$) и трактуется таким образом: типичная оптическая плотность раствора суспензии хлореллы, не прошедшей обработку, составляет 1,05. Коэффициенты регрессии трактуется, как влияние каждой из переменных на величину оптической плотности, если все другие независимые переменные остаются неизменными.

Максимальный вклад в изменение оптической плотности суспензии хлореллы вносит концентрация озона $C[O_3]$ ($\beta = 0,45$ при уровне значимости $p = 0,000082$). Данный факт указывает на то, что при фиксации значений других переменных, рост концентрации озона в установленном диапазоне даёт возможность увеличить рост оптической плотности на 0,45 %. Дополнительно определены статически значимые парные воздействия, увеличивающие оптическую плотность:

– $C[O_3] M$: $\beta = 0,3$ при уровне значимости $p = 0,015$;

– $\tau C[O_3]$: $\beta = 0,37$ при уровне значимости $p = 0,06$.

– Учитывая данные регрессионного (таблица) анализа, выполнено построение зависимостей в виде диаграмм представленных на рисунках 2–4.

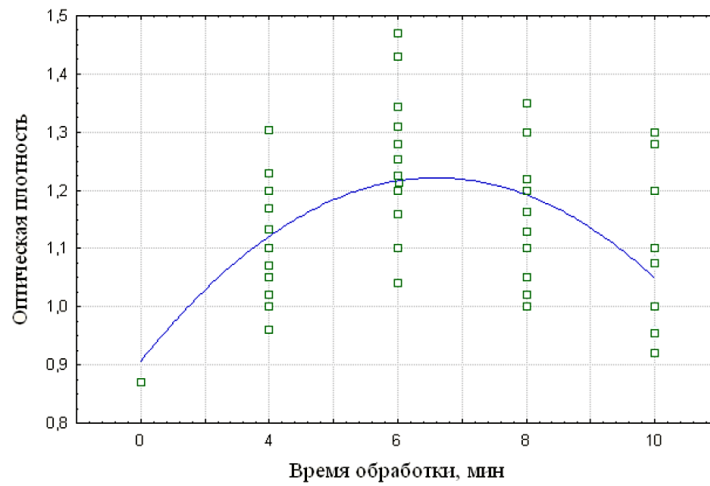


Рис. 2 – Диаграмма зависимости оптической плотности суспензии от времени обработки

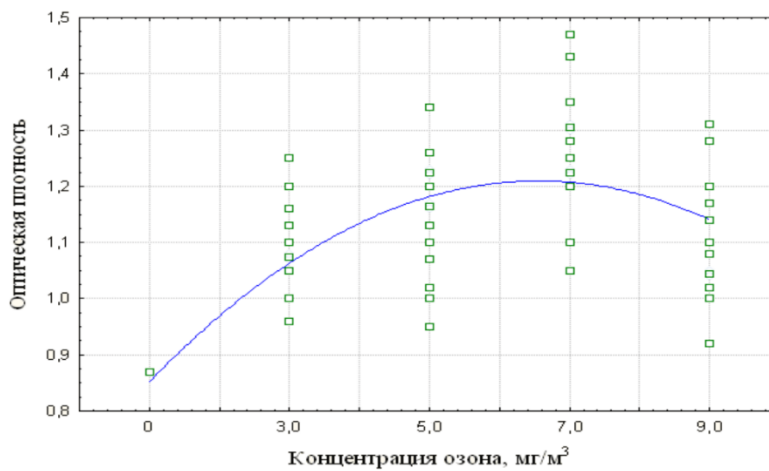


Рис. 3 – Диаграмма зависимости оптической плотности суспензии от концентрации озона

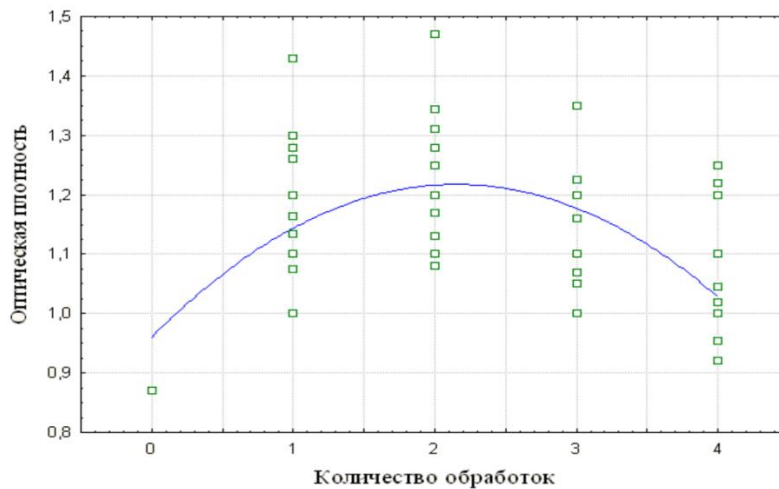


Рис. 4 – Диаграмма зависимости оптической плотности суспензии от количества обработок

Основываясь на результатах, полученных в ходе исследования, выполним построение диаграммы (рис. 5), графически показывающей влияние на оптическую плотность суспензии y_2 таких факторов, как продолжительность обработки (τ) и концентрация озона ($C[O_3]$). Анализ построенных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что в процессе увеличения концентрации озона и продолжительности обработки суспензии хлореллы рост оптической плотности происходит до момента достижения экстремума функции, который находится в точке, соответствующей следующим значениям: $C[O_3] = 7,0 \text{ мг/м}^3$; $\tau = 6 \text{ мин}$. Соответственно при указанных значениях плотность суспензии достигает своих наибольших значений. Следовательно превышение данных параметров будет приводить уменьшению оптической плотности, что свидетельствует о снижении биостимулирующего эффекта.

Для описания данного способа обработки представим уравнение регрессии (3):

$$D_{\text{хл}} = 0,46 + 0,21 \cdot \tau + 0,29 \cdot C_{\text{оз}} - 0,046 \cdot \tau^2 + 0,006 \cdot \tau \cdot C_{\text{оз}} - 0,05 \cdot C_{\text{оз}}^2. \quad (3)$$

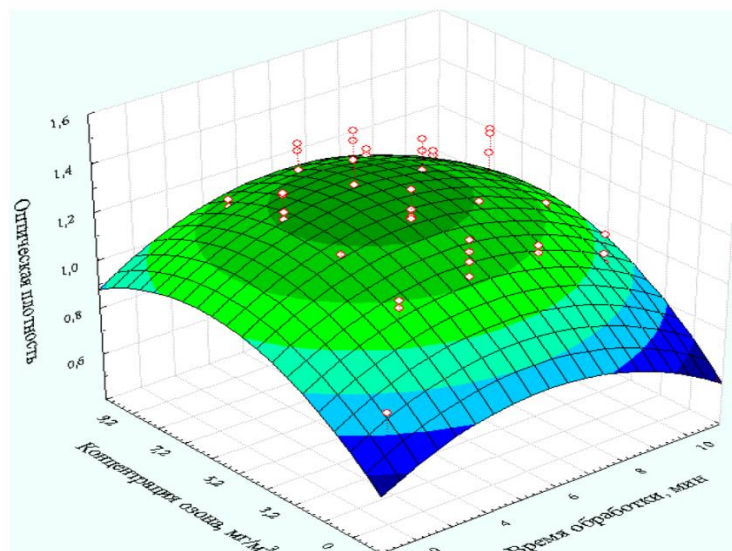


Рис. 5 – Диаграмма влияния времени обработки τ и концентрации озона $C_{\text{оз}}$ на оптическую плотность раствора суспензии хлореллы $D_{\text{хл}}$

Определив оптимальную концентрацию озона ($C[\text{O}_3]$) и продолжительность обработки (τ), далее следует определить, с какой периодичностью необходимо выполнять обработку суспензии хлореллы.

С этой целью выполнено построение соответствующей диаграммы (рис. 6), на которой представлены зависимости трёх рассмотренных ранее факторов: $D_{\text{хл}}$, $C[\text{O}_3]$ и M в рамках четырёхдневного цикла.

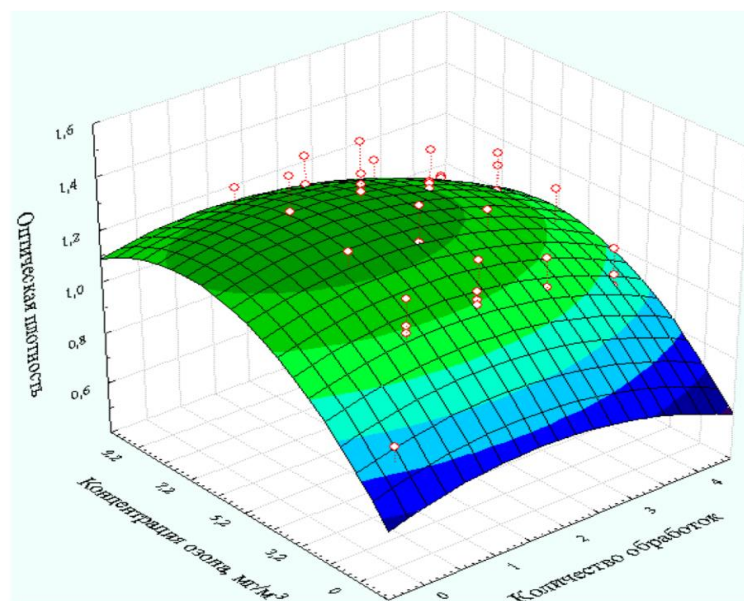


Рис. 6 – Диаграмма зависимости оптической плотности раствора суспензии хлореллы y_2 от концентрации озона $C_{\text{оз}}$ и количества обработок M в рамках четырёхдневного цикла

На основе анализа экспериментальной поверхности установлено, что при озонировании с учётом оптимальной концентрации $7,0 \text{ мг/м}^3$ увеличение оптической плотности суспензии достигается в рамках четырёхдневного цикла за счёт проведения обработки от одного до двух раз. При дальнейшем увеличении количества обработок наблюдается снижение оптической плотности суспензии, соответственно наиболее оптимально выполнять обработку не чаще двух раз за четыре дня.

На основе анализа построенной поверхности установлено, что в оптимальном режиме озонирования ($C[\text{O}_3] = 7,0 \text{ мг/м}^3$) повышение оптической плотности суспензии достигается за счёт проведения одной-двух обработок в течение четырёхдневного цикла.

В соответствии с результатами статического анализа, уравнение множественной регрессии (4) описывает зависимость оптической плотности (независимая переменная) от исследуемых факторов:

$$D_{\text{хл}} = 0,45 + 0,37 \cdot C_{\text{оз}} + 0,12 \cdot M - 0,046 \cdot C_{\text{оз}}^2 - 0,005 \cdot C_{\text{оз}} M - 0,023 \cdot M^2. \quad (4)$$

Итогом выполненных исследований является вывод о том, что для достижения максимального роста оптической плотности суспензии хлореллы при озоновоздушной обработке необходимо обеспечить достижение следующих параметров: концентрация озона – 7,0 мг/м³; время обработки – 6 минут; кратность обработок – 2 раза в течение четырёх дней.

Сравнительный анализ показал, что через двое суток после начала культивирования концентрация клеток хлореллы во всех экспериментальных группах с использованием озонирования превысила базовый уровень. Максимальные значения по каждому уровню обработки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние озоновоздушной обработки на рост клеток хлореллы

Показатель роста хлореллы	Концентрация озона, мг/м ³				Контроль
	3,0	5,0	7,0	9,0	
Концентрация клеток, кл/мл	20,45·10 ⁶	22,23·10 ⁶	24,47·10 ⁶	21,74·10 ⁶	14,1·10 ⁶
Оптическая плотность суспензии	1,21	1,32	1,45	1,30	0,85

Визуально результаты обработки представлены на рисунках 7 и 8.

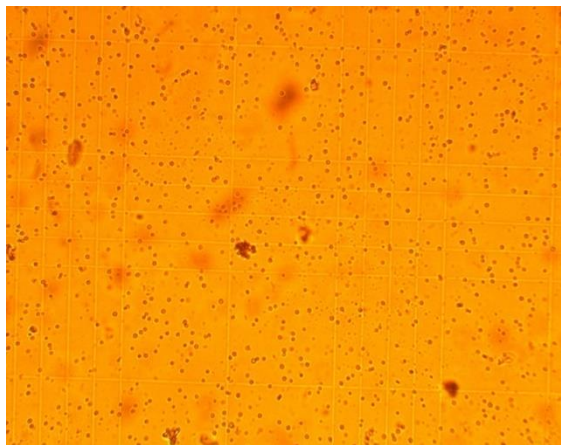


Рис. 7 – Фотография контрольного образца суспензии хлореллы

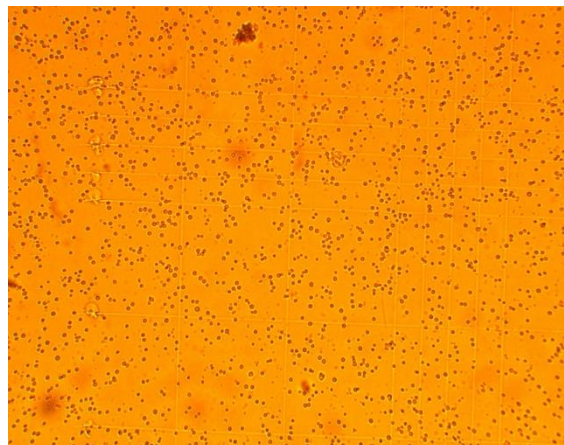


Рис. 8 – Фотография суспензии хлореллы, прошедшей электроозонную обработку с концентрацией озона – 7,0 мг/м³ при времени – 6 минут

Максимальной концентрации клеток *Chlorella vulgaris* при анализе всех исследованных режимов обработки озоновоздушной смесью удалось достичь при концентрации озона $C[O_3]$ равной 7,0 мг/м³. Полученный показатель превышает значение контрольного варианта без применения озонирования более чем на 70 % и значения других вариантов озонирования на величину от 10,4 до 19 %. Аналогичная закономерность установлена и для оптической плотности клеточной суспензии. В то же время дальнейшее повышение концентрации озона губительно сказывается на делении молодых клеток хлореллы [2, 3].

Выводы. Таким образом, на основании представленных результатов сделаем следующие выводы.

1. Разработанные регрессионные модели (3 и 4) дают возможность количественно оценить вклад каждого фактора в процесс стимуляции роста *Chlorella vulgaris*.
2. Высокая адекватность полученной модели ($R^2=0,86$) доказывает, что три исследуемых параметра $D_{хл}$, $C[O_3]$ и M являются определяющими в вопросе оптимизации режимов обработки озоновоздушной смесью раствора суспензии хлореллы.
3. По результатам экспериментальных исследований определены режимы обработки суспензии хлореллы штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №С – 111, позволяющие в два раза увеличить производительность культиватора:
 - концентрация озона $C[O_3] = 7,0$ мг/м³;
 - длительность обработки $\tau = 6$ мин.;
 - кратность обработок $M = 2$ раза в течение четырёх дней.

При этом же режиме зафиксирована наивысшая оптическая плотность клеточной суспензии, что косвенно подтверждает наибольший прирост биомассы.

Библиография

1. Петраков Е.С. Применение добавки на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* в кормлении цыплят-бройлеров / Е. С. Петраков, В. А. Лукьянов, М. М. Наумов [и др.] // Проблемы биологии продуктивных животных. 2016. № 1. С. 96–104.
2. Гадзама И.У. Хлорелла обыкновенная как кормовая добавка и компонент корма для сельскохозяйственных животных: всесторонний обзор / И. У. Гадзама, С. Рэй, Р. Мейте [и др.] // Animals. 2025. Т. 15, № 6. С. 879.
3. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т. Культивирование и применение микроводорослей. Ташкент : Фан, 1984. 185 с.
4. Пандиселвам Р. Озон как новая перспективная технология для обеззараживания продуктов водного происхождения / Р. Пандиселвам, С. Субхашини, П. С. БануПрия [и др.] // Ozone: Science&Engineering. 2020. Т. 42, № 3. С. 237–249.
5. Способ борьбы с варроатозом пчел. Нормов Д. А., Овсянников Д. А., Николаенко С. А., Нормова Т. А. / Патент на изобретение RU 2324342 C1, 20.05.2008. Заявка № 2006128062/12 от 01.08.2006.
6. Способ борьбы с аскосферозом. Нормов Д. А., Овсянников Д. А., Заболотная И. А., Вербицкий В. В., Нормова Т. А. / Патент на изобретение RU 2237404 C2, 10.10.2004. Заявка № 2002135255/12 от 25.12.2002.

7. Термоадаптивный блок озонатора. Андрейчук В. К., Нормов Д. А., Драгин В. А., Харченко П. М., Нормова Т. А. / Патент на изобретение RU 2181103 C2, 10.04.2002. Заявка № 99121820/12 от 19.10.1999.
8. Электроразрядный термоадаптивный элемент озонатора. Нормов Д. А., Андрейчук В. К., Шхалахов Р. С., Драгин В. А., Нормова Т. А. / Патент на изобретение RU 2179151 C2, 10.02.2002. Заявка № 2000107683/12 от 28.03.2000.
9. El-Mashad H.M. Development of a Low-Cost Ozone (O₃) Generator for Research and Education in Agricultural and Food Applications / H. M. El-Mashad, M. A. I. Al-Saadi, S. A. Al-Harbi [et al.] // Processes. 2025. Vol. 13, № 11. P. 3637.
10. Шевченко А.А. Влияние озонородушной смеси на вредоносные микроорганизмы, содержащиеся в субстратах / А. А. Шевченко, Е. А. Сапрунова, Е. А. Денисенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 100. С. 772–785.
11. Плеханов С.Е. Изучение состояния клеток микроводоросли *Chlorella* по проводимости в переменном электрическом поле / С. Е. Плеханов, В. Д. Мятлев, Л. Б. Братковская, Е. С. Озерова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2013. Т. 12, № 2. С. 416–422.
12. Gadzama I.U., Ray S., Méité R., et al. *Chlorella vulgaris* as a Livestock Supplement and Animal Feed: A Comprehensive Review // Animals. 2025. Vol. 15, № 6. P. 879.
13. Фролова М.В. Особенности влияния штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №с-111 на качество воды в прудовом рыбодоводстве / М. В. Фролова, М. В. Московец, Л. А. Птицына, А. Ю. Торопов // Орошаемое земледелие. 2019. № 3. С. 46–49.
14. ТУ 10.91.10-298-37676459-2023. Продукты из хлореллы для животных. Введ. 2023 Москва : Научно-производственный Центр «Агропищепром», 2023 15 с.
15. Сторчевой В.Ф. Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля / В. Ф. Сторчевой, Ю. А. Судник, А. Н. Мануйленко // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 66–73.

References

1. Petrakov E.S. Primenenie dobavki na osnove mikrovodoroslej *Chlorella vulgaris* v kormlenii cyp-lyat-brojlerov [Application of an additive based on microalgae *Chlorella vulgaris* in the feeding of broiler chickens] / E. S. Petrakov, V. A. Luk'yanov, M. M. Naumov [i dr.] // Problemy biologii produktivny'x zhivotny'x. 2016. № 1. S. 96–104.
2. Gadzama I.U. *Chlorella* oby'knovennaya kak kormovaya dobavka i komponent korma dlya sel'skoxozyaj-stvenny'x zhivotny'x: vsestronnij obzor [*Chlorella vulgaris* as a feed additive and a component of feed for farm animals: a comprehensive review] / I. U. Gadzama, S. Re'j, R. Mejte [i dr.] // Animals. 2025. T. 15, № 6. S. 879.
3. Muzzafarov A.M., Taubaev T.T. Kul'tivirovanie i primenenie mikrovodoroslej [Cultivation and application of microalgae]. Tashkent: Fan, 1984. 185 s.
4. Pandiselvam R. Ozon kak novaya perspektivnaya texnologiya dlya obezzarazhivaniya produktov vodnogo proisxozhdeniya [Ozone as a new promising technology for disinfection of aquatic products] / R. Pandiselvam, S. Subhashini, P. S. BanuPriya [i dr.] // Ozone: Science&Engineering. 2020. T. 42, № 3. S. 237–249.
5. Sposob bor'by' s varroatozom pchel [A way to combat varroatoz of bees]. Normov D. A., Ovsyannikov D. A., Nikolaenko S. A., Normova T. A. / Patent na izobretenie RU 2324342 C1, 20.05.2008. Заявка № 2006128062/12 от 01.08.2006.
6. Sposob bor'by' s askosferozom [A way to combat ascospheiosis]. Normov D. A., Ovsyannikov D. A., Zabolotnaya I. A., Verbizkij V. V., Normova T. A. / Patent na izobretenie RU 2237404 C2, 10.10.2004. Заявка № 2002135255/12 от 25.12.2002.
7. Термоадаптивный блок озонатора [Thermoadaptive ozonator unit]. Andrejchuk V. K., Normov D. A., Dragin V. A., Xarchenko P. M., Normova T. A. / Patent na izobretenie RU 2181103 C2, 10.04.2002. Заявка № 99121820/12 от 19.10.1999.
8. E'lektrozaryadny'j termoadaptivny'j e'lement ozonatora [Electric discharge thermoadaptive element of the ozonator]. Normov D. A., Andrejchuk V. K., Shxalaxov R. S., Dragin V. A., Normova T. A. / Patent na izobretenie RU 2179151 C2, 10.02.2002. Заявка № 2000107683/12 от 28.03.2000.
9. El-Mashad H.M. Development of a Low-Cost Ozone (O₃) Generator for Research and Education in Agricultural and Food Applications / H. M. El-Mashad, M. A. I. Al-Saadi, S. A. Al-Harbi [et al.] // Processes. 2025. Vol. 13, № 11. P. 3637.
10. Shevchenko A.A. Vliyanie ozonovozdushnoj smesi na vredonosny'e mikroorganizmy, sodержashchiesya v substratax [The effect of the ozone-air mixture on harmful microorganisms contained in the substrates] / A. A. Shevchenko, E. A. Saprunova, E. A. Denisenko // Politematicheskij setevoy e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. № 100. S. 772–785.
11. Plexanov S.E. Izuchenie sostoyaniya kletok mikrovodorosli *Chlorella* po provodimosti v peremennom e'lektricheskom pole [Study of the state of *Chlorella* microalgae cells by conduction in an alternating electric field] / S. E. Plexanov, V. D. Myatlev, L. B. Bratkovskaya, E. S. Ozerova // Sistemny'j analiz i upravlenie v biomedicinskix sistemax. 2013. T. 12, № 2. S. 416–422.
12. Gadzama I. U., Ray S., Méité R., et al. *Chlorella vulgaris* as a Livestock Supplement and Animal Feed: A Comprehensive Review // Animals. 2025. Vol. 15, № 6. P. 879.
13. Frolova M.V. Osobennosti vliyaniya shtamma *Chlorella vulgaris* IFR №с-111 na kachestvo vody v prudovom rybovodstve [Features of the effect of *Chlorella vulgaris* strain IGF No.c-111 on water quality in pond fish farming] / M. V. Frolova, M. V. Moskovecz, L. A. Pticyna, A. Yu.Toropov // Oroshaemoe zemledelie. 2019. № 3. S. 46–49.
14. ТУ 10.91.10-298-37676459-2023. Продукты из хлореллы для животных [Chlorella products for animals]. Введ. 2023 Москва : Научно-производственный Центр «Агропищепром», 2023 15 с.
15. Storchevoj V.F. E'lektricheskij ozonator-izluchatel' vozduxa dlya sel'skoxozyajstvenny'x pomeshhe-nij: rezul'taty' issledovanij avtonomnogo modulya [Electric ozonator-air emitter for agricultural premises: research results of the autonomous module] / V. F. Storchevoj, Yu. A. Sudnik, A. N. Manujlenko // Agroinzheneriya. 2024. T. 26, № 5. S. 66–73.

Сведения об авторах

Нормов Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Лиственничная аллея, д. 6, Москва, Россия, 127550, тел. +7 (499) 976-18-78, e-mail: danormov@mail.ru;

Федоренко Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Лиственничная аллея, д. 6, Москва, Россия, 127550, тел. +7 (499) 976-15-76, e-mail: fedorenko_ea@mail.ru;

Соловьёв Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Лиственничная аллея, д. 6, Москва, Россия, 127550, тел. +7 (499) 976-18-78, e-mail: ser-solovyev@yandex.ru;

Брус Виталий Владимирович, инженер-электрик, ООО «Краснодар Водоканал», ул. Каляева, д. 198, Краснодар, Россия, 350062, +7-(928)-332-03-34, e-mail: vbrus@rambler.ru;

Болотин Владимир Леонидович, инженер, ООО «Краснодар Водоканал», ул. Каляева, д. 198, Краснодар, Россия, 350062, +7-(961)-519-38-49, e-mail: v.bolotin@rosvodokanal.ru.

Information about authors

Normov Dmitriy Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, acting head of the department of electricity supply and heat power engineering named after academician I.A. Budzko, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy», 6 Larch Alley, Moscow, Russia, 127550, tel. +7 (499) 976-18-78, e-mail: danormov@mail.ru;

Fedorenko Evgeniy Alexandrovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of electricity supply and heat power engineering named after academician I.A. Budzko, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy», 6 Larch Alley, Moscow, Russia, 127550, tel. +7 (499) 976-15-76, e-mail: fedorenko_ea@mail.ru;

Solovev Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of electricity supply and heat power engineering named after academician I.A. Budzko, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy», 6 Larch Alley, Moscow, Russia, 127550, tel. +7 (499) 976-18-78, e-mail: ser-solovyev@yandex.ru;

Brus Vitalij Vladimirovich, electrical engineer, limited liability company «Krasnodar Vodokanal», 198 Kalyaeva St., Krasnodar, Russia, 350062, +7-(928)-332-03-34, e-mail: vbrus@rambler.ru;

Bolotin Vladimir Leonidovich, engineer, limited liability company «Krasnodar Vodokanal», 198 Kalyaeva St., Krasnodar, Russia, 350062, +7-961-519-38-49, e-mail: v.bolotin@rosvodokanal.ru.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СУХИХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ВАКУУМНЫМ ОТВОДОМ ЧАСТИЦ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА ЗАДАННОЙ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Аннотация. Процесс измельчения занимает важное место в технологических линиях переработки растительных материалов и производства продуктов питания различного назначения. При создании биологически активных добавок в виде растительного порошка к конечному продукту предъявляются строгие требования, в том числе, по степени измельчения. Размер частиц зависит от вида сырья и его назначения. При этом лишний помол может стать причиной повышенной энергозатратности процесса измельчения. В статье описывается конструкция двухсекционной шаровой мельницы с возможностью удаления из зоны помола частиц, достигающих заданной степени измельчения. Мельница состоит из цилиндрической и конусной секций, разделенных перфорированной решеткой, причем в первой из них содержатся шары большего диаметра, а во второй – меньшего. Также конструкция предусматривает наличие впускного и выпускного патрубков. На впускном патрубке расположен жиклер для контроля входящего потока воздуха. Корпус мельницы располагается на подшипниках качения и выполнен с возможностью вращения от приводного двигателя. Отвод частиц осуществляется путем создания давления разрежения разработанным жидкостнокольцевым вакуумным насосом. Применение вакуума обеспечивает подсушку и исключает перегрев измельчаемого материала. В работе описана методика расчета технологических и конструктивных параметров двухсекционной цилиндрикоконусной шаровой мельницы. Также приводится методика выбора и обоснования конструкции жидкостнокольцевого вакуумного насоса. Для повышения эффективности процесса измельчения предлагается использовать жидкостнокольцевой вакуумный насос с устройством автоматического регулирования размеров нагнетательного окна. Описанные в статье подходы будут применены при создании лабораторной установки для получения растительных порошков с заданным модулем помола.

Ключевые слова: переработка растительного материала, шаровая мельница, степень помола, мощность измельчения, вакуумный отвод частиц.

THEORETICAL CALCULATION OF DRY ORGANIC MATERIALS' GRINDING IN THE BALL MILL WITH A VACUUM REMOVAL OF PARTICLES TO OBTAIN A POWDER OF A GIVEN DEGREE OF GRINDING

Abstract. The grinding process plays a significant role in the technological lines of plant processing and manufacturing of various food products. In the production of biologically active supplements in the form of vegetable powders, stringent requirements are set for the final product, including with respect to the level of particle size. The particle size is dependent on the type of raw material and its intended use, but excessive grinding can result in increased energy consumption during the grinding process. This paper describes the design and operation of a two-stage ball mill with the ability to separate particles from the grinding chamber that have reached a specific level of fineness. The mill consists of two sections: a cylindrical and a conical section, separated by a perforated screen. In the first stage, larger diameter balls are used, while in the second stage, smaller diameter balls are employed. The mill also includes inlet and outlet pipes, with a nozzle attached to the inlet pipe to control the airflow. The body of the mill is supported by rolling bearings and is driven by a motor. Particles are separated by creating a vacuum using a liquid ring vacuum pump, which ensures efficient drying and prevents overheating. A method for calculating the technological and structural parameters of the two-stage cylindrical cone mill is presented in the paper. Additionally, a method for selecting and designing a liquid ring vacuum pump is provided. To improve the efficiency of the grinding process, we propose using a liquid ring vacuum pump equipped with an automatic sizing device for the discharge port. The techniques outlined in this paper will be utilized in the development of a laboratory-scale setup for manufacturing vegetable powders at a specific grinding modulus.

Keywords: processing of plant material, ball mill, grinding degree, grinding power, vacuum removal of particles.

Введение. Производство порошков с заданным модулем помола является актуальной задачей для многих отраслей, например, заготовки кормов в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, фармацевтики, химической промышленности [1-3]. Изготовление порошков из растительных материалов сопровождается высушиванием сырья до определенной влажности с последующим измельчением [4-5]. Основные сложности процесса измельчения – затраты энергии на лишний помол, неоднородность и влажность готового порошка.

Снижения затрат можно достигнуть своевременным удалением частиц заданной степени измельчения из зоны помола. Это обеспечит получение порошка с определенной дисперсностью и более эффективное дробление материала вследствие того, что уже измельченные частицы не будут мешать процессу.

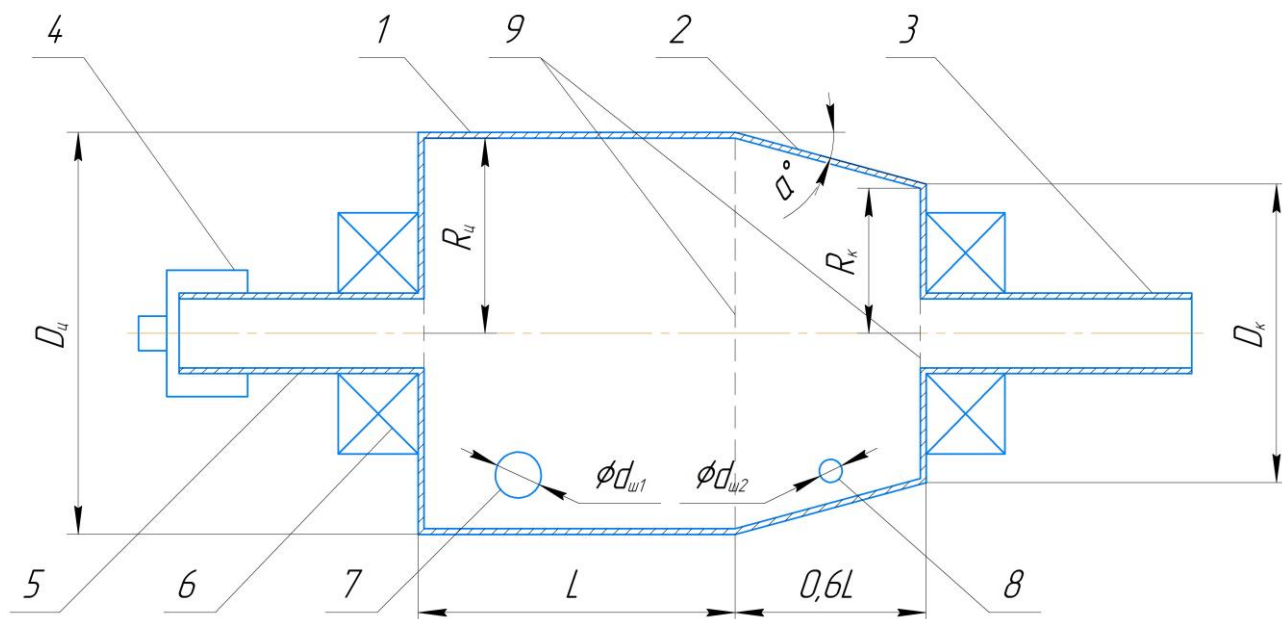
В статье предлагается осуществлять измельчение растительного сырья в двухсекционной шаровой мельнице с вакуумным отводом частиц [6-7].

Цель статьи заключается в изучении функциональных зависимостей, имеющих место при измельчении растительных материалов, и разработке методики расчета параметров двухсекционной цилиндрикоконусной шаровой мельницы с возможностью вакуумного отвода частиц растительного материала определенной степени измельчения.

Основная часть. За основу разрабатываемой методики расчета двухсекционной мельницы взяты положения теории измельчения и теории течения газов, теории вакуумирования и законы прикладной механики [8-9].

Конструкция разрабатываемой цилиндрикоконусной шаровой мельницы представлена на рисунке 1.





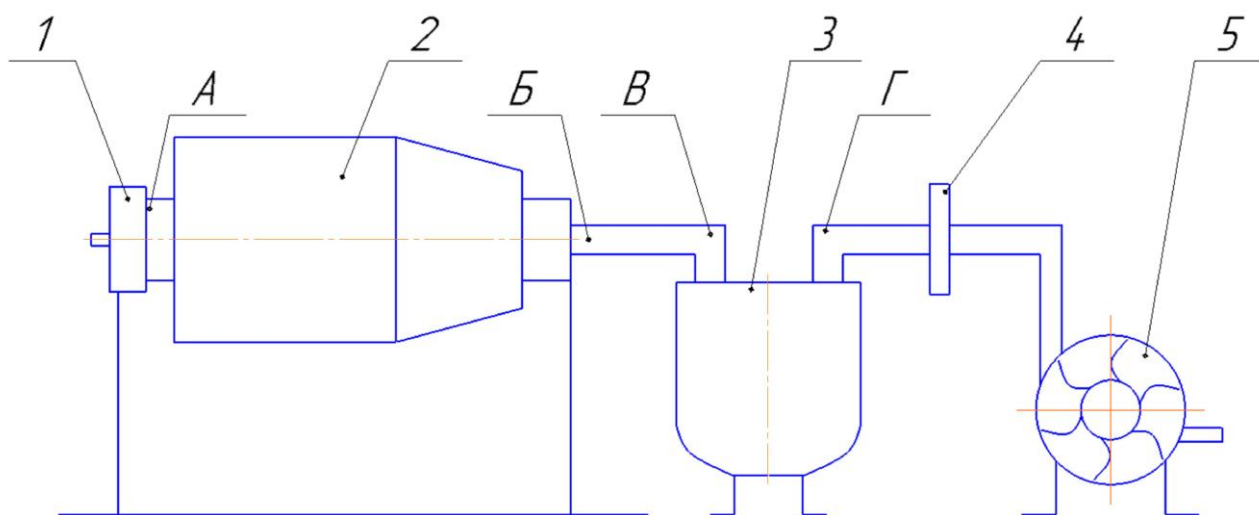
1 – цилиндрическая секция; 2 – конусная секция; 3 – выпускной патрубок; 4 – жиклер; 5 – впускной патрубок; 6 – подшипники качения; 7 – шар большого диаметра; 8 – шар малого диаметра; 9 – решетка перфорированная

Рис. 1 – Цилиндроконусная шаровая мельница

Мельница включает в себя два барабана: цилиндрический 1 с диаметром $D_{\text{ц}}$ и конусный 2 с малым диаметром $D_{\text{к}}$. Барабаны разделены между собой перфорированной решеткой 9. В цилиндрической секции расположены крупные шары 7 с диаметром $d_{\text{ш1}}$, в конусной – мелкие шары 8 с диаметром $d_{\text{ш2}}$. Двухсекционная мельница расположена на подшипниках качения 6, которые посажены на впускающий 5 и выпускающий 3 патрубки. Через впускающий и выпускающий патрубки осуществляется загрузка измельчаемого материала и вакуумный отвод измельченного материала соответственно. В конструкции также предусмотрен жиклер 4 для создания воздушного потока и обеспечения при этом отвода частиц порошка заданной фракции.

Влияние на производительность процесса и общие энергозатраты оказывает способ удаления измельченного материала. По этой причине дополнительно к шаровой мельнице организована транспортная система, представленная на рисунке 2.

Измельчаемый материал загружается в шаровую цилиндроконусную мельницу 2 (рис. 2), слева от которой установлен жиклер 1. Разряжением, создаваемым жидкостнокольцевым вакуумным насосом (ЖВН) 5, измельченный до заданной степени растительный материал поступает в циклон-накопитель. Задвижка 4 служит для регулирования отвода частиц за счет давления разряжения.



1 – жиклер; 2 – шаровая цилиндроконическая мельница; 3 – циклон-накопитель; 4 – задвижка; 5 – вакуумный насос; А – участок всасывания воздушной массы; Б – участок установившегося движения материаловоздушной смеси; В – участок торможения; Г – участок удаления воздушной смеси

Рис. 2 – Схема установки для измельчения сухих растительных материалов с транспортной системой отвода

При этом вакуумно-транспортная система разделена на четыре участка [10]: А, Б, В, Г. Участок А характеризует всасывание воздушной массы А. Участок Б отвечает за установившееся течение смеси частиц заданного помола с воздухом.

Участок В показывает путь торможения. Поседений участок Г отвечает за удаление воздушной смеси. Отвод измельченных частиц исключает их чрезмерное измельчение, которое потребляет энергию и приводит к излишнему нагреву материала.

Помол в барабанных мельницах характеризуется степенью измельчения i_{Π} :

$$i_{\Pi} = \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{н}}$, $d_{\text{к}}$ – начальный и конечный размер частиц измельчаемого материала, м.

Помол в двухсекционной мельнице позволяет считать общую степень измельчения i_0 произведением степени измельчения каждой секции:

$$i_0 = i_1 \cdot i_2, \quad (2)$$

где i_1 , i_2 – степень измельчения первой и второй секций.

Диаметр шаров цилиндрической и конусной секции $d_{\text{ш1}}$, $d_{\text{ш2}}$ [мм], соответственно, определяем по формулам:

- первая цилиндрическая секция:

$$d_{\text{ш1}} = 6,003 \sqrt[3]{d_{\text{ср1}}}, \quad (3)$$

- вторая конусная секция:

$$d_{\text{ш2}} = 6,003 \sqrt[3]{d_{\text{ср2}}}, \quad (4)$$

где $d_{\text{ср1}}$, $d_{\text{ср2}}$ – средний размер частиц измельченного материала в цилиндрической и конусной секциях, м.

Отношение между длиной L и диаметром барабана D проверяем экспериментально. Секции делим в соотношении 1,0–0,6 и 1,0–1,0, при этом первую и вторую секции заполняем шарами на 20 %, материалом в первой секции заполняется 40 %. Описание расчетов приводится на примере двухсекционной мельницы с соотношением секций 1,0–0,6.

В секциях цилиндрической шаровой мельницы находятся мелющие шары и измельчаемый материал. Массовое содержание шаров в цилиндрической $\Psi_{\text{шц}}$ и конусной $\Psi_{\text{шк}}$ секциях находим по степени загрузки каждой секции, как:

$$\Psi_{\text{шц}} = \frac{G_{\text{шц}}}{\rho_{\text{шц}}^{\text{нас}} \cdot V_{\text{ц}}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G_{\text{шц}}}{\rho_{\text{шц}}^{\text{нас}} \cdot D_{\text{ц}}^2 L_{\text{ц}}}, \quad (5)$$

$$\Psi_{\text{шк}} = \frac{G_{\text{шк}}}{\rho_{\text{шк}}^{\text{нас}} \cdot V_{\text{к}}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G_{\text{шк}}}{\rho_{\text{шк}}^{\text{нас}} \cdot D_{\text{ксп}}^2 L_{\text{к}}}, \quad (6)$$

где $G_{\text{шц}}$, $G_{\text{шк}}$ – массовое содержание шаров по секциям; $\rho_{\text{шц}}^{\text{нас}}$, $\rho_{\text{шк}}^{\text{нас}}$ – насыпная плотность шаров цилиндрической и конусной секций, кг/м³; $D_{\text{ц}}$, $D_{\text{ксп}}$ – диаметр цилиндрической и конусной секций соответственно, м; $L_{\text{ц}}$, $L_{\text{к}}$ – длина цилиндрической и конусной секций соответственно, м; $V_{\text{ц}}$, $V_{\text{к}}$ – объем цилиндрической и конической секций, м³;

В формуле (6) используется средний диаметр конусной секции $D_{\text{ксп}}$, который вычисляется, как:

$$D_{\text{ксп}} = \frac{D_{\text{ц}} + D_{\text{к}}}{2}, \quad (7)$$

где $D_{\text{к}}$ – наименьший диаметр конической секции, м.

Принимаем, что частицы измельчаемого сырья полностью заполняют пространство между мелющими телами (межшаровое пространство), так как частицы много меньше мелющих шаров. Объем шаров и измельчаемого материала $V_{\text{шмц}}$ и $V_{\text{шмк}}$, можно выразить как:

$$V_{\text{шмц}} = V_{\text{ц}} \Psi_{\text{шц}}, \quad (8)$$

$$V_{\text{шмк}} = V_{\text{к}} \Psi_{\text{шк}}. \quad (9)$$

Объемное содержание для цилиндрической секции $\Psi_{\text{вц}}$:

$$\Psi_{\text{вц}} = \begin{cases} \Psi_{\text{шц}} & \text{при } u_{\text{ц}} \leq 1, \\ \Psi_{\text{шц}} \left[\frac{\rho_{\text{шц}}^{\text{нас}}}{\rho_{\text{шц}}^{\text{ист}}} + u_{\text{ц}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{шц}}^{\text{нас}}}{\rho_{\text{шц}}^{\text{ист}}} \right) \right] & \text{при } u_{\text{ц}} > 1. \end{cases} \quad (10)$$

Для конусной секции $\Psi_{\text{вк}}$:

$$\psi_{vk} = \begin{cases} \psi_{шк} \text{ при } u_k \leq 1, \\ \psi_{шк} \left[\frac{\rho_{шк}^{нас}}{\rho_{шк}^{ист}} + u_k \left(1 - \frac{\rho_{шк}^{нас}}{\rho_{шк}^{ист}} \right) \right] \text{ при } u_k > 1. \end{cases} \quad (11)$$

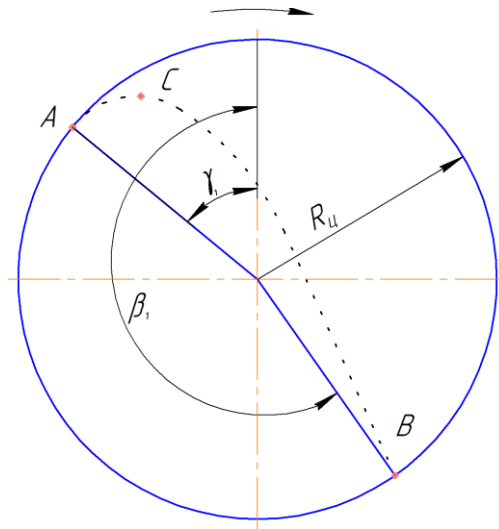
где $u_{ц}$, u_k – степени заполнения межшарового пространства измельчаемым материалом в цилиндрической и конусной секциях.

Для выполнения расчетов вводится понятие безразмерной скорости вращения секций, которая находится как относительная скорость φ :

$$\varphi = \frac{\omega}{\omega_{кр}} = \frac{n}{n_{кр}}, \quad (12)$$

где ω – угловая скорость вращения секции, м/мин; n – частота вращения секции, мин⁻¹; ω_k – критическая угловая скорость вращения секции, м/мин; n_k – критическая частота вращения секции, мин⁻¹.

Работа двухсекционной цилиндроконусной шаровой мельницы осуществляется при частоте вращения секций ниже критической величины. При этом измельчаемый материал вместе с шарами поднимаются вверх по стенке, отрывается от нее и по инерции движется вверх, после чего падает, описывая траекторию, обозначенную пунктирной линией на рисунке 3.



$R_{ц}$ – внутренний радиус цилиндрической секции; γ_1 – угол точки отрыва частиц материала; β_1 – угол точки падения частиц материала; A – точка отрыва; C – наивысшая точка траектории частиц; B – точка удара

Рис. 3 – Схема движения измельчаемых частиц растительного материала в цилиндрической секции шаровой цилиндроконусной мельнице

Аналогичное движение происходит в конусной секции, однако расположение точек отрыва, удара и наивысшего положения будет отличаться от изображенной на рисунке 3 схеме, соответственно углы γ_2 и β_2 будут иметь другие значения. Несмотря на уклон конусной части секции шары, находящиеся в ней, не скатываются к разделительной сетке за счет движения воздушной массы, создаваемой вакуумным насосом [11-12].

В верхней точке круговой орбиты происходит уравнивание силы тяжести центробежной силой. Критическую угловую скорость первой секции $\omega_{кр1}$ [рад/с] можно определить соотношением:

$$\omega_{кр1}^2 R_{ц} = g, \quad (13)$$

отсюда:

$$\omega_{кр1} = \sqrt{\frac{g}{R_{ц}}}. \quad (14)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Таким образом, критическую частоту вращения первой секции $n_{кр1}$ [об/мин] рассчитываем из условия равновесия на стенке цилиндрической секции. В качестве основного размера выбираем внутренний диаметр цилиндрической секции мельницы $D_{ц}$:

$$n_{кр1} = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2g}{D_{ц}}}. \quad (15)$$

Из формулы (15) получаем:

$$n_{kp1} = \frac{42,3}{\sqrt{D_{\Pi}}}, \quad (16)$$

или через радиус цилиндрической секции:

$$n_{kp1} = \frac{29,91}{\sqrt{R_{\Pi}}} \quad (17)$$

Угол отрыва материала с круговой траектории в первой секции мельницы γ_1 [рад] находим как:

$$\gamma_1 = \arccos \frac{\omega_1^2 \cdot R_{\Pi}}{g}. \quad (18)$$

При этом в верхней точке траектории вертикальная составляющая угловой скорости равна нулю. Время подъема мелящего тела для первой секции t_{c1} [с], определяем, как:

$$t_{c1} = \sqrt{\frac{R_{\Pi}}{g}} \cdot \varphi_1 \cdot \sqrt{1 - \varphi_1^4} \quad (19)$$

Координаты высшей точки C (рисунок 3) x_{c1} , y_{c1} для первой секции определяются как:

$$x_{c1} = -R_{\Pi} \left(1 - \varphi_1^4\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (20)$$

$$y_{c1} = R_{\Pi} \frac{\varphi_1^2}{2} \left(3 - \varphi_1^4\right). \quad (21)$$

Координаты точки удара B (рисунок 3) x_{b1} , y_{b1} :

$$x_{b1} = R_{\Pi} \sqrt{1 - \varphi_1^4} \left(4\varphi_1^4 - 1\right), \quad (22)$$

$$y_{b1} = R_{\Pi} \varphi_1^2 \left(4\varphi_1^4 - 3\right). \quad (23)$$

При этом угол падения β_1 [рад] получаем:

$$\beta_1 = \begin{cases} \pi - \arctg \frac{x_{b1}}{y_{b1}} \text{ при } y_{b1} < 0, \\ \arctg \frac{y_{b1}}{x_{b1}} + \frac{3}{2} \pi \text{ при } y_{b1} \geq 0. \end{cases} \quad (24)$$

Продолжительность полета t_{f1} [с]:

$$t_{f1} = 4 \sqrt{\frac{R_{\Pi}}{g}} \varphi_1 \sqrt{1 - \varphi_1^4} \quad (25)$$

Продолжительность оборота цилиндрического барабана t_{o1} [с]:

$$t_{o1} = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{\varphi_1 \omega_{kp1}} \quad (26)$$

Продолжительность движения тела по траектории, показанной на рисунке 3, в первой секции равна t_{k1} [с]:

$$t_{k1} = \frac{(\beta_1 - \alpha_1)}{2\pi} t_{o1} = \frac{4}{\varphi_1} \sqrt{\frac{R_{\Pi}}{g}} \arctg \left(\frac{\varphi_1^2}{\sqrt{1 - \varphi_1^4}} \right) \quad (27)$$

Время оборачиваемости загрузки первой секции t_{v1} [с]:

$$t_{v1} = t_{f1} + t_{k1} \quad (28)$$

Для конусной части барабана расчет производится для среднего радиуса конуса, т.е. для $R_{кр}$ по аналогичным формулам с использованием величин φ_2 , и ω_2 .

Длину цилиндрической секции принимаем равной диаметру цилиндрической части барабана L [м]:

$$L = 2R_{ц} \quad (29)$$

Проведенный нами анализ механики движения млеющих тел в цилиндроконусной шаровой мельнице подтвердил, что наиболее целесообразно тонкое измельчение при каскадном режиме, когда разрушение происходит в основном истиранием, что особенно важно в конической секции при уменьшении практического коэффициента вращения менее 75 %.

Производительность шаровой мельницы зависит от следующих факторов:

- физические свойства и крупность измельчаемого материала;
- конструкция и форма футеровки мельницы;
- эксплуатационные условия работы.

Вследствие многочисленности и разнородности влияющих факторов определение производительности аналитически невозможно. Поэтому производительность цилиндроконусной мельницы рассчитывают, исходя из практических данных работы действующей установки при режиме, близком к оптимальному.

При вакуумном измельчении материал подвергается нагреву до 60–70 °С и осуществляется постоянная сушка, что позволяет поддерживать качественное измельчение. Данный процесс можно записать в виде системы уравнений второго периода вакуумной конвективной сушки [13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \end{cases}, \quad (30)$$

где $\frac{\partial C}{\partial \tau}$, $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – производные влагосодержания и температуры материала по времени; ∂x – единичный линейный пара-

метр материала (длина); $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ – вторая производная, характеризующая изменение влагосодержания по сечению материала;

D_e – коэффициент диффузии.

После расчета конструктивных параметров шаровой цилиндроконусной мельницы определяем режим удаления измельченных частиц заданной степени измельчения.

Производительность установки находим, согласно формуле Q_B кг/с [6]:

$$Q_B = \frac{G_M \cdot v_{ср}^2}{2p} \leq S_{\Phi}(p), \quad (31)$$

где G_M – производительность цилиндроконусной мельницы по сыпучему материалу, кг/с; p – начальное давление воздуха в транспортном трубопроводе, кПа; $v_{ср}$ – средняя скорость движения частиц измельчаемого материала, м/с; $S_{\Phi}(p)$ – фактическая быстрота действия ЖВН при рассчитанном давлении разрежения, м³/с.

Давление вакуумного отвода (всасывания) частиц материала $p_{вс}$ [кПа] рассчитываем по формуле:

$$p_{вс} = p_{кр} + \Delta p, \quad (32)$$

где $p_{кр}$ – критическое давление поднятия частиц, кПа; Δp – общие потери давления в установке с цилиндроконусной мельницей, кПа.

Частицы будут транспортироваться воздушным потоком при создании скорости потока выше критической $v_{кр}$ [м/с], которую определяем, как:

$$v_{кр} = B \cdot 4 \sqrt{\frac{g \cdot D}{v_{ВИТ}^2}} \cdot 9 \sqrt{\frac{\rho_{см} - \rho_B}{\rho} \cdot \left(\frac{\rho_{ТВ}}{\rho_B} \right)^2} \cdot K, \quad (33)$$

где $\rho_{см}$, ρ_B , $\rho_{ТВ}$ – плотность аэросмеси, воздуха, твердых частиц перемещаемого материала кг/м³; B – коэффициент транспортирования, м/с;

Скорость витания $v_{\text{ВИТ}}$ [м/с], считаем по формуле:

$$v_{\text{ВИТ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{C_x \cdot A_M \cdot \rho_B}}, \quad (34)$$

где m – масса измельчаемой частицы, кг; A_M – площадь миделева сечения частицы, м²; C_x – коэффициент, учитывающий сопротивление при обтекании измельчаемой частицы воздушным потоком.

Общие потери давления воздушного потока Δp [кПа], считаем, как [6]:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ТЕХ}} + \Delta p_{\text{ТТ}} + \Delta p_{\text{ВТ}}, \quad (35)$$

где $\Delta p_{\text{ТЕХ}}$, $\Delta p_{\text{ТТ}}$, $\Delta p_{\text{ВТ}}$ – потери давления воздушного потока в технологическом оборудовании, воздушного потока в транспортном трубопроводе, в воздушном трубопроводе, кПа.

Потери давления в оборудовании и трубопроводах для подстанции в выражение (33) определяются согласно формулам, приведенным в работе [6].

В зависимости от окончательной величины частиц измельчаемого материала следует выбирать ЖВН с определенным давлением разрежения. Т.е., основываясь на требуемую степень измельчения, выбирается определенная величина вакуума, поэтому предлагаем использовать ЖВН с возможностью регулирования давления разрежения. Также вакуумный насос выбирается, основываясь на производительность установки и требуемую быстроту действия ЖВН [14]. Для выбранного ЖВН определяется мощность согласно методике, изложенной в [15].

Мощность, затрачиваемую на измельчение в двухсекционной цилиндрикоконусной шаровой мельнице сырья до заданной степени измельчения N_0 [кВт], определяем, как:

$$N_0 = N_1 + N_2, \quad (36)$$

где N_1 – мощность измельчения в цилиндрикоконусной мельнице, кВт; N_2 – мощность, затрачиваемая на создание разрежения, кВт.

Мощность измельчения в цилиндрикоконусной мельнице равна:

$$N_1 = 5,0(Z_1 m_{\text{ш1}} + Z_2 m_{\text{ш2}}) \cdot \sqrt{D_{\text{Ц}}}, \quad (37)$$

где $m_{\text{ш1}}$, $m_{\text{ш2}}$ – масса шаров первой и второй секций соответственно, кг; Z_1 , Z_2 – количество шаров в первой и второй секциях соответственно, шт.

Коэффициент 5,0 был определен экспериментально [6].

Мощность, которая затрачивается на создание разрежения в шаровой мельнице, определяется как мощность работы ЖВН с автоматически регулируемым нагнетательным окном (ЖВН РНО):

$$N_2 = N_{\text{сж}} + N_{\text{бл}} + N_{\text{л}} + N_{\text{мех}}, \quad (38)$$

где $N_{\text{сж}}$ – мощность сжатия парогазовой смеси в ЖВН РНО, кВт; $N_{\text{бл}}$ – мощность сил трения жидкости в безлопаточном пространстве ЖВН РНО, кВт; $N_{\text{л}}$ – мощность вращения жидкостного кольца в лопаточном пространстве ЖВН РНО, кВт; $N_{\text{мех}}$ – мощность, затрачиваемая на механическое трение в деталях ЖВН РНО, кВт;

Также формулу расчета мощности ЖВН РНО можно представить в следующем виде, допустив, что механические потери в данном насосе составляют до 5 % от всех затрат:

$$N_2 = 1,05(N_{\text{сж}} + N_{\text{бл}} + N_{\text{л}}) \quad (39)$$

Далее рассчитываем и подставляем каждое слагаемое, как описано в работе [15].

Таким образом, комбинированная методика расчёта двухсекционной цилиндрикоконусной шаровой мельницы и жидкостнокольцевого вакуумного насоса, объединённых в единую пневмотранспортную систему, позволяет разрабатывать наиболее эффективные системы для производства мелкодисперсного порошка заданной степени помола из растительного материала.

Выводы. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- 1) предложена конструкция двухсекционной цилиндрикоконусной шаровой мельницы для помола высушенного растительного материала с заданной степенью частиц;
- 2) представлена методика расчета для определения длины секций, диаметра мелющих тел, скорости вращения барабана и степени его загрузки, предложенной цилиндрикоконусной мельницы;
- 3) разработана методика расчета параметров жидкостнокольцевого вакуумного насоса с устройством регулирования величины создаваемого вакуума для отвода частиц растительного материала заданной степени измельчения.

Полученные результаты будут применены при создании лабораторной установки для получения растительных порошков с заданным модулем помола. Перспективой дальнейших исследований является испытание энергосберегающей конструкции одноступенчатого ЖВН, а также разработка двухступенчатого комбинированного ЖВН для сверхтонкого помола.

Библиография

1. Перфилова О.В. Применение свч-, ик-нагрева в технологии получения морковного порошка из выжимок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 1(79). С. 144–148.
2. Abdulvahit Sayaslan, Mehmet Koyuncu, Nazlı Şahin, Chapter 27 - Wet-milling of wheat and maize, Editor(s): Peter R. Shewry, Hamit Koksel, John R.N. Taylor, ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology, Academic Press, 2023, Pages 261-268, ISBN 9780323952958, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00025-3>.

3. L.O. Pordesimo, C. Igathinathane, G.A. Holt, Hammer milling switchgrass from weathered bales, *Industrial Crops and Products*, Volume 197, 2023, 116647, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116647>.
4. Проблемы и перспективы производства растительных порошков / Ю. В. Родионов, О. В. Ломакина, Д. В. Никитин [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. № 1(27). С. 69–77.
5. Совершенствование технологии получения порошков из растительного сырья / С. И. Данилин, Ю. Ю. Родионов, Ю. В. Родионов [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2020. № 4. С. 150–159.
6. Теоретический расчет двухступенчатого измельчителя сухих растительных материалов заданной степени помола с применением вакуума / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, С. И. Данилин [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14. № 3(70). С. 32–41.
7. Возможности применения жидкостно-кольцевого вакуумного насоса с автоматическим регулируемым нагнетательным окном при измельчении виноградных семян и выжимок / Ю. Ю. Родионов, А. И. Скоморохова, Ю. В. Родионов [и др.] // Магарах. Виноградарство и виноделие. 2021. Т. 23. № 1(115). С. 55–60.
8. Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации / А. А. Туз, Г. Н. Санаева, А. Е. Пророков, В. Н. Богатиков // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 2(33). С. 130.
9. Осипов Д.А. Совместное измельчение и классификация разнородных компонентов для выделения целевого продукта : дисс. ... кандидата техн. наук : 05.17.08. Иваново, 2019. 139 с.
10. Особенности расчета технологии вакуумного транспортирования сухих сыпучих растительных материалов в режиме сплошного слоя / П. С. Платинин, Ю. В. Родионов, В. П. Капустин, Д. В. Никитин // Наука в центральной России. 2016. № 6(24). С. 54–65.
11. Выбор жидкостнокольцевого вакуумного насоса для шаровой мельницы с вакуумным отводом / Ю. А. Чумиков, Ю. В. Родионов, А. И. Скоморохова [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 12. С. 115–123. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-12-115-123. EDN NSIOTC.
12. Двухступенчатая шаровая мельница с вакуумным отводом частиц для измельчения сухого растительного материала / Ю. Ю. Родионов, Ю. А. Чумиков, Ю. В. Родионов, А. И. Скоморохова // Наука и Образование. 2020. Т. 3, № 4. С. 88. EDN FSAOMR.
13. Иванова Е. П. Разработка технологии приготовления сухой закваски на основе растительного сырья для производства хлебобулочных изделий функционального назначения: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук : 05.18.01. Мичуринск, 2016. 151 с.
14. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression / Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57. № 5–6. P. 477–483.
15. Комбинированная конструкция жидкостно-кольцевого вакуумного насоса для технологических процессов АПК / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, А. С. Зорин, Г. В. Рыбин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2022. Т. 14, № 2. С. 166–176. DOI 10.36508/RSATU.2022.54.2.020. EDN FDKNBB.

References

1. Perfilova O.V. Primenenie svch-, ik-nagreva v tehnologii polucheniya morkovnogo poroshka iz vy'zhimok // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenerny'x tekhnologij*. 2019. T. 81. № 1(79). S. 144–148.
2. Abdulvahit Sayaslan, Mehmet Koyuncu, Nazlı Şahin, Chapter 27 - Wet-milling of wheat and maize, Editor(s): Peter R. Shewry, Hamit Koksel, John R.N. Taylor, *ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology*, Academic Press, 2023, Pages 261-268, ISBN 9780323952958, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00025-3>.
3. L.O. Pordesimo, C. Igathinathane, G.A. Holt, Hammer milling switchgrass from weathered bales, *Industrial Crops and Products*, Volume 197, 2023, 116647, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116647>.
4. Problemy i perspektivy proizvodstva rastitel'nykh poroshkov [Problems and prospects for the production of plant powders] / Yu. V. Rodionov, O. V. Lomakina, D. V. Nikitin [i dr.] // *Tekhnologii pishchevoj i pererabatyvayushchej promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*. 2019. № 1(27). S. 69–77.
5. Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya poroshkov iz rastitel'nogo syr'ya [Improvement of the technology for obtaining powders from vegetable raw materials] / S. I. Danilin, Yu. Yu. Rodionov, Yu. V. Rodionov [i dr.] // *Tekhnologii pishchevoj i pererabatyvayushchej promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*. 2020. № 4. S. 150–159.
6. Teoreticheskij raschet dvukhstupenchatogo izmel'chiteya sukhikh rastitel'nykh materialov zadannoj stepeni pomola s primeneniem vakuuma [Theoretical calculation of a two-stage grinder of dry plant materials of a given degree of grinding using vacuum] / Yu. V. Rodionov, D. V. Nikitin, S. I. Danilin [i dr.] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021. T. 14. № 3(70). S. 32–41.
7. Vozmozhnosti primeneniya zhidkostno-kol'tseвого вакуумного насоса s avtomaticheskim reguliruемым nagnetatel'ny'm oknom pri izmel'chenii vinogradnykh semyan i vyzhimok [Possibilities of using a liquid-ring vacuum pump with an automatic adjustable injection port when grinding grape seeds and refuses] / Yu. Yu. Rodionov, A. I. Skomorokhova, Yu. V. Rodionov [i dr.] // *Magarach. Vinogradarstvo i vinodelie*. 2021. T. 23. № 1(115). S. 55–60.
8. Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami izmel'cheniya i osnovnye napravleniya ikh avtomatizatsii [Control of grinding processes and the main directions of their automation] / A. A. Tuz, G. N. Sanaeva, A. E. Prorokov, V. N. Bogatnikov // *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2016. T. 8. № 2(33). S. 130.
9. Osipov D.A. Sovmestnoe izmel'chenie i klassifikatsiya raznorodnykh komponentov dlya vydeleniya tselevogo produkta [Joint grinding and classification of dissimilar components to isolate the target product]: diss. ... kandidata tekhn. nauk : 05.17.08. Ivanovo, 2019. 139 s.
10. Osobennosti rascheta tekhnologii vakuumnogo transportirovaniya sukhikh sypuchikh rastitel'nykh materialov v rezhime sploshnogo sloya [Peculiarities of calculation of the technology of vacuum transportation of dry loose plant materials in the continuous layer mode] / P. S. Platitsin, Yu. V. Rodionov, V. P. Kapustin, D. V. Nikitin // *Nauka v tsentral'noj Rossii*. 2016. № 6(24). S. 54–65.
11. Vybór zhidkostnokol'tseвого вакуумного насоса dlya sharovoy mel'nitsy s vakuumnym otvodom [Selection of liquid ring vacuum pump for vacuum ball mill] / Yu. A. Chumikov, Yu. V. Rodionov, A. I. Skomorokhova [i dr.] // *Vestnik Belgorodskogo*

gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. 2023. № 12. S. 115–123. DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-12-115-123. EDN NSIOTC.

12. Dvukhstupenchataya sharovaya mel'nitsa s vakuumnym otvodom chastits dlya izmel'cheniya sukhogo rastitel'nogo materiala [Two-stage ball mill with vacuum removal of particles for grinding dry plant material] / Yu. Yu. Rodionov, Yu. A. Chumikov, Yu. V. Rodionov, A. I. Skomorokhova // Nauka i Obrazovanie. 2020. T. 3, № 4. S. 88. EDN FSAOMR.

13. Ivanova E.P. Razrabotka tekhnologii prigotovleniya sukhoy zakvaski na osnove rastitel'nogo syr'ya dlya proizvodstva khlebobulochnykh izdelij funktsional'nogo naznacheniya [Development of technology for preparing dry starter based on vegetable raw materials for the production of bakery products of functional purpose]: dis. ... kandidata sel'skokhozyajstvennykh nauk : 05.18.01. Michurinsk, 2016. 151 s.

14. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression / Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57. № 5–6. P. 477–483.

15. Rodionov Yu.V. Sovershenstvovanie teoreticheskikh metodov rascheta i obosnovanie parametrov i rezhimov zhidkost-nokol'tsevykh vakuumnykh nasosov s ucheto osobennostej tekhnologicheskikh protsessov v APK [Improvement of theoretical methods of calculation and substantiation of parameters and modes of liquid-ring vacuum pumps, taking into account the features of technological processes in the agro-industrial complex]: dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.20.01. Tambov, 2013. 434 s.

Сведения об авторах

Родионов Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Тамбовский ГТУ», Мичуринская 112 к. А, ауд. 302, г. Тамбов, Россия, 393760, профессор кафедры «Технологии производства, хранения и переработки продукции растениеводства» ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ», тел.: 89204780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru;

Чумиков Юрий Анатольевич, аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Тамбовский ГТУ», Мичуринская 112 к. А, ауд. 302, г. Тамбов, Россия, 393760;

Скоморохова Анастасия Игоревна, аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «Тамбовский ГТУ», Мичуринская 112 к. А, ауд. 302, г. Тамбов, Россия, 393760, тел.: 89158870115, e-mail: nasta373@mail.ru;

Рыбин Григорий Вячеславович, аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Тамбовский ГТУ», Мичуринская 112 к. А, ауд. 302, г. Тамбов, Россия, 393760, инженер ЦКП «Селекция сельскохозяйственных культур и технологии производства, хранения и переработки продуктов питания функционального и лечебно-профилактического назначения», ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» тел.: 89531220146, e-mail: enot1237@gmail.com.

Information about authors

Rodionov Yuri Viktorovich, Doctor of technical sciences, professor of the department of mechanics and engineering graphics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University», Michurinskaya 112 b.A, room 302, Tambov, Russia, 393760, professor of the department of technology of production, storage and processing of crop production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Michurinsky State Agrarian University», tel.: 89204780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru;

Chumikov Yuri Anatolyevich, postgraduate student of the department of mechanics and engineering graphics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University», Michurinskaya 112 b.A, room 302, Tambov, Russia, 393760;

Skomorokhova Anastasia Igorevna, postgraduate student of the department of computer integrated systems in mechanical engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University», Michurinskaya 112 b.A, room 302, Tambov, Russia, 393760, phone: 89158870115, e-mail: nasta373@mail.ru;

Rybin Grigory Vyacheslavovich, postgraduate student of the department of mechanics and engineering graphics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University», Michurinskaya 112 b.A, room 302, Tambov, Russia, 393760, engineer of the collective use center «Crop breeding and technologies for the production, storage and processing of functional and therapeutic food products», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Michurinsky State Agrarian University» tel.: 89531220146, e-mail: enot1237@gmail.com.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ШИНЫ ПРИ КАЧЕНИИ КОЛЕСА В СВОБОДНОМ И ВЕДОМОМ РЕЖИМАХ

Аннотация. Установлена неоднозначность результатов, получаемых при составлении мощностного и силового балансов на основе статического радиуса и радиуса качения колеса, принимаемых в качестве плеча действия силы. Их различие объясняется исследователями неприемлемостью аксиом теоретической механики к описанию модели взаимодействия сил, реакций и их моментов применительно к шинам, в отличие от твердых тел. На основе положений геометрии и аксиом статики о свойствах эквивалентных пар сил получены аналитические выражения, определяющие силовые соотношения при качении колеса в свободном и ведомом режимах с учетом смещения нормальной реакции опорной поверхности. При выводе силовых и геометрических соотношений между параметрами качения шины в ведомом режиме является исходное уравнение момента сопротивления деформации шины и пары продольных сил с приведением условной линии действия продольной реакции опорной поверхности к радиусу качения колеса в свободном режиме. Представлено последовательное преобразование эквивалентных схем действия момента и пар сил с приведением продольной реакции к статическому радиусу и продольным смещением нормальной реакции опорной поверхности относительно оси колеса. Приведены развернутые уравнения силового, мощностного и энергетического балансов при параллельном переносе продольной реакции с приведением условной линии ее действия к радиусу качения колеса в ведомом режиме. На численном примере показаны результаты расчетов силовых и геометрических параметров качения для автомобильного колеса с шиной модели 11,0-R20 Pirelli. Полученные аналитические выражения для силовых и геометрических соотношений при качении колеса в свободном и ведомом режимах свидетельствуют о возможности и необходимости совместного использования в качестве определяющих параметров двух радиусов – радиуса качения колеса в свободном режиме и статического радиуса колеса. Применение аксиом теоретической механики об эквивалентности моментов пар сил позволяет переходить от уравнений силового баланса к уравнениям мощностного и энергетического балансов с учетом всех входящих в них составляющих без нарушения однозначности и определенности результатов.

Ключевые слова: колесо, шина, качение, свободный режим, ведомый режим, сила, реакция, радиус, плечо, смещение, коэффициент.

THEORETICAL TIRE MECHANICS DURING ROLLING WHEELS IN FREE AND DRIVEN MODES

Abstract. The ambiguity of the results obtained when compiling power and power balances based on the static radius and rolling radius of the wheel, taken as a force arm, has been established. Their discrepancy is explained by researchers by the unacceptability of the axioms of theoretical mechanics to the description of the interaction of forces, reactions and their moments in relation to tires, in contrast to solids. Based on the concepts and positions of geometry, theoretical mechanics and axioms of statics on the properties of equivalent force pairs obtained analytical expressions, determining force relations at wheel rolling in free and driven modes taking into account displacement of normal reaction of support surface. Initial equation of moment of resistance to deformation of tire and pair of longitudinal forces with reduction of conventional line of action of longitudinal reaction of bearing surface to radius of wheel rolling in free mode is used as starting point in deriving force and geometric relations between parameters of tire rolling in driven mode. Serial conversion of equivalent schemes of action of moment and pairs of forces with reduction of longitudinal reaction to static radius and longitudinal displacement of normal reaction of bearing surface relative to wheel axis is presented. Detailed equations of power, power and energy balances at parallel transfer of longitudinal reaction with reduction of conventional line of its action to wheel rolling radius in driven mode are given. The numerical example shows the results of calculations of power and geometric rolling parameters for a car wheel with a model 11.0-R20 Pirelli tire. Obtained analytical expressions for force and geometrical relations at wheel rolling in swinging and driven modes testify to possibility and necessity of joint use as determining parameters of two radii – wheel rolling radius in free mode and static radius of wheel. Application of axioms of theoretical mechanics on equivalence of moments of force pairs pos-allows to perform transition from equations of power balance to equations of power and energy balance considering all components included in them without violation of unambiguity and certainty of results.

Keywords: wheel, tire, rolling, free mode, slave mode, force, reaction, radius, shoulder, displacement, coefficient.

Введение. Для вывода уравнений силовых, мощностных и энергетических балансов при качении колеса в различных режимах используют динамический радиус r_d [1-7], отождествляемый со статическим радиусом $r_{ст}$, близким к нему по своему численному значению, или радиус качения в свободном режиме $r_{к св}$ [8-14], что приводит к неоднозначным результатам.

Как отмечал В.А. Петрушов [1], на противоречие между уравнениями силового и мощностного балансов эластичного колеса применительно к качению колеса в ведомом режиме впервые обратил внимание В.И. Новопольский еще в 60-е годы прошлого столетия.

Противоречие заключается в том, что из мощностного баланса при качении колеса в ведомом режиме, представленного с использованием обозначений из источника [1] в виде сопряженных равенств,

$$N_{f0} = P_{f0} r_{к0} \omega_k = M_{f0} \omega_k = G_k a_0 \omega_k, \quad (1)$$

где N_{f0} – мощность сопротивления качению колеса; P_{f0} – горизонтальная сила, приложенная к оси ведомого колеса; $r_{к0}$ – радиус качения колеса в ведомом режиме; ω_k – угловая скорость оси колеса; M_{f0} – момент сопротивления качению колеса; G_k – вертикальная нагрузка на колесо; a_0 – плечо сопротивления качению ведомого колеса, следует, что момент сопротивления качению колеса определяется зависимостью

$$M_{f0} = P_{f0} r_{к0}, \quad (2)$$

тогда как из уравнения силового равновесия колеса

$$P_{f0} r_d - Z_k a_0 = 0, \quad (3)$$

следует иное представление правой части выражения по сравнению с зависимостью (2)

$$M_{f0} = Z_k a_0 = P_{f0} r_d, \quad (4)$$

где Z_k – вертикальная реакция, равная весу G_k , приходящемуся на колесо; r_d – динамический радиус колеса.

Из формул (2) и (4) должно следовать равенство радиусов

$$r_{k0} = r_d, \quad (5)$$

однако оно неправомерно, так как нарушает очевидное соотношение между радиусами

$$r_{k0} > r_d. \quad (6)$$

При рассмотрении других режимов качения колеса также не исключены подобные противоречия [1, 2]. Их частичное разрешение применительно к качению колеса в ведущем и тормозном режимах при условии отсутствия буксования и скольжения представлено в работе В.А. Петрушова [1], в которой связующим параметром является радиус качения колеса в соответствующем режиме.

Неоднозначность результатов, получаемых при составлении мощностного и силового балансов на основе радиусов, принимаемых в качестве плеча действия силы, отмечает С.П. Пожидаев [12], объясняя их разночтение неприемлемостью аксиом теоретической механики к описанию модели взаимодействия сил, реакций и их моментов применительно к эластичным колесам, в отличие от твердых тел.

Цель исследований. Целью исследования является обоснование правомерности теоретического представления взаимосвязей между параметрами качения колеса в свободном и ведомом режимах качения с использованием понятий и положений геометрии, теоретической механики и аксиом статики о свойствах эквивалентных пар сил.

Материалы и методы. В теории качения колеса свободному режиму качения колеса придается очень большое значение, однако же этот режим, по утверждению В.И. Коптилова [3], обстоятельно никем не рассматривался.

Как известно, свободный режим является базовым. При его осуществлении к оси колеса приложены крутящий момент и момент сопротивления деформации шины, равные по величине и противоположно направленные (рисунок 1, а),

$$M_k = M_{\text{деф}}. \quad (7)$$

В вертикальной плоскости на колесо действует нормальная нагрузка и нормальная реакция опорной поверхности, также равные по величине и направленные противоположно

$$G_k = R_z. \quad (8)$$

Схему, изображенную на рисунке 1, а, можно представить другой схемой с замещением момента сопротивления деформации шины $M_{\text{деф}}$ эквивалентной парой сил G_k и R_z , действующих на плече, равном продольному деформационному смещению нормальной реакции на величину $a_{\text{нр деф}}$ в направлении поступательного движения колеса (рис. 1, б).

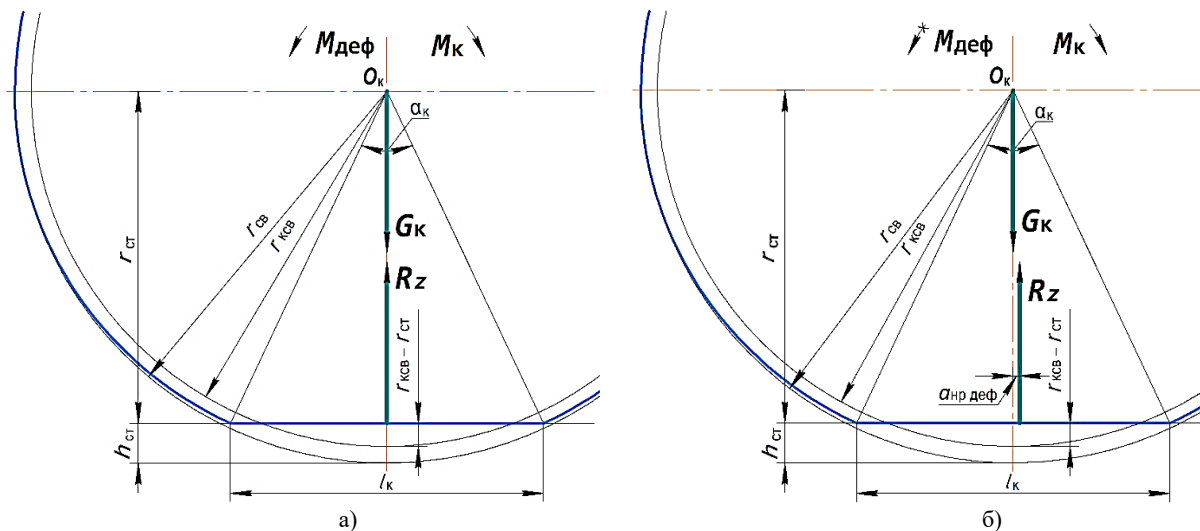


Рис. 1 – Схема действия моментов и сил при качении колеса в свободном режиме

Этой схеме соответствует уравнение

$$M_k = R_z a_{\text{нр деф}}. \quad (9)$$

При качении колеса в ведомом режиме к его оси O_k приложена продольная толкающая сила P_x , направленная в сторону поступательного движения колеса. Ей противодействует продольная реакция R_x со стороны опорной поверхности (рис. 2, а)

$$P_x = R_x. \quad (10)$$

Примем в качестве отправного пункта исходное уравнение моментов, выраженное в компактном свернутом виде (11), устанавливающее зависимость между силовыми и геометрическими параметрами качения шины в ведомом режиме, с приведением условной линии действия продольной реакции к радиусу качения колеса в свободном режиме

$$R_x r_{\text{к св}} = M_{\text{деф}}, \quad (11)$$

где $M_{\text{деф}}$ – момент сопротивления деформации шины; $r_{\text{к св}}$ – радиус качения колеса в свободном режиме.

В этом выражении радиус качения колеса в свободном режиме выступает универсальной характеристикой эластичного колеса, в виде которой он представлен в работе С.П. Пожидаева [13].

Схема на рисунке 2, а может быть изображена в другом виде при замещении момента сопротивления деформации шины $M_{\text{деф}}$ моментом эквивалентной пары сил G_k и R_z на плече $a_{\text{нр деф}}$, интерпретируемом как деформационное смещение центра нормальной реакции опорной поверхности, соответствующее режиму качения колеса в свободном режиме при преодолении момента $M_{\text{деф}}$ (рис. 2, б),

$$R_x r_{\text{к св}} = R_z a_{\text{нр деф}}. \quad (12)$$

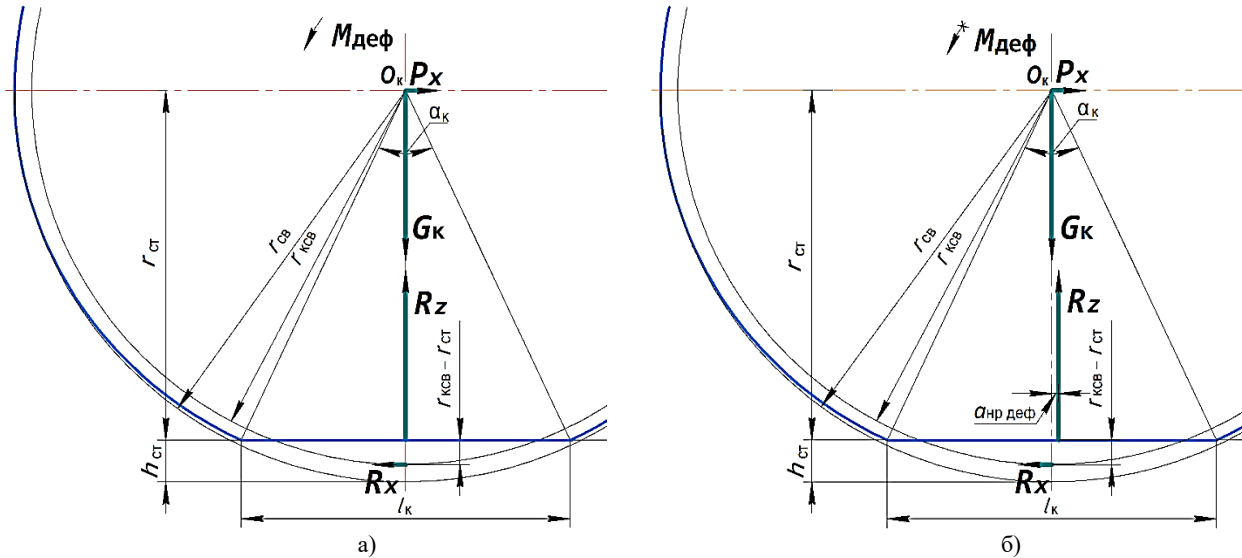


Рис. 2 – Схема действия момента и пар сил с приведением продольной реакции к радиусу качения в свободном режиме

Из уравнения (5) следует другое развернутое выражение на основе статического радиуса $r_{\text{ст}}$ в соответствии с расчетной схемой, изображенной на рисунке 3, а, с учетом равенства между собой продольных реакций R_x , R'_x и R''_x ,

$$R''_x r_{\text{к св}} = M_{\text{деф}} = R_x r_{\text{ст}} + R''_x (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}) = R_x r_{\text{ст}} + R_x (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}). \quad (13)$$

Схема на рисунке 3, а может быть преобразована в схему на рисунке 3, б при параллельном переносе продольной реакции опорной поверхности R_x в плоскость контакта шины с опорной поверхностью на расстояние, определяемое разностью радиусов $r_{\text{к св}}$ и $r_{\text{ст}}$, и приложении момента эквивалентной пары условных сил R'_x и R''_x на плече $h = r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}$.

Схеме на рисунке 3, б соответствует уравнение моментов

$$R_z a_{\text{нр деф}} = R_x r_{\text{ст}} + R''_x (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}) = R_x r_{\text{ст}} + R_x (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}). \quad (14)$$

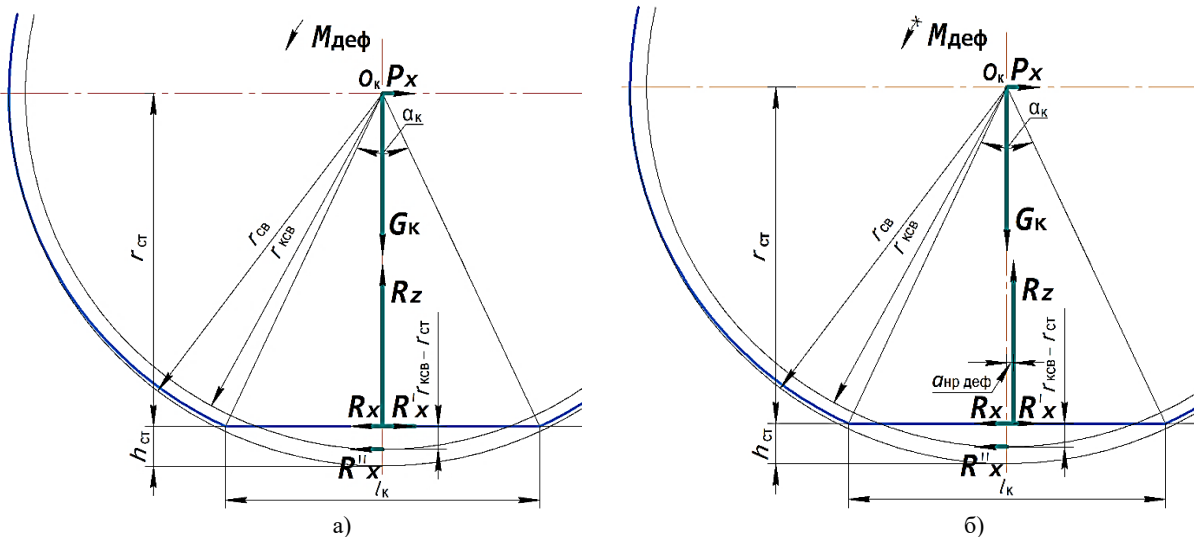


Рис. 3 – Схема действия момента и пар сил с приведением продольной реакции к статическому радиусу и смещением нормальной реакции

Схема на рисунке 3, б может быть приведена к схеме, представленной фрагментом на рисунке 4, а, на которой начальное положение замещающей пары условных продольных реакций R'_x и R''_x на плече $h = (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}})$ изображено тонкими линиями, а конечное положение действующей реакции R_x – основной линией.

Вместо момента, создаваемого замещающей парой условных продольных сил R'_x и R''_x на плече, определяемом разностью радиусов $h = (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}})$, в рассмотрение вводится момент эквивалентной пары условных нормальных сил R'_z и R''_z на

плече $a_{\text{нр поз}}$, равному продольному позиционному смещению нормальной реакции из первоначального положения R_z в положение R'_z против направления поступательного движения колеса.

Поскольку силы R_z и R''_z , расположенные на одной линии, уравнивают друг друга, они подлежат исключению из рассмотрения.

После графического преобразования получаем схему, представленную на рисунке 4, б, на которой условная нормальная сила R'_z , переименована в нормальную реакцию опорной поверхности R_z и выделена утолщенной линией.

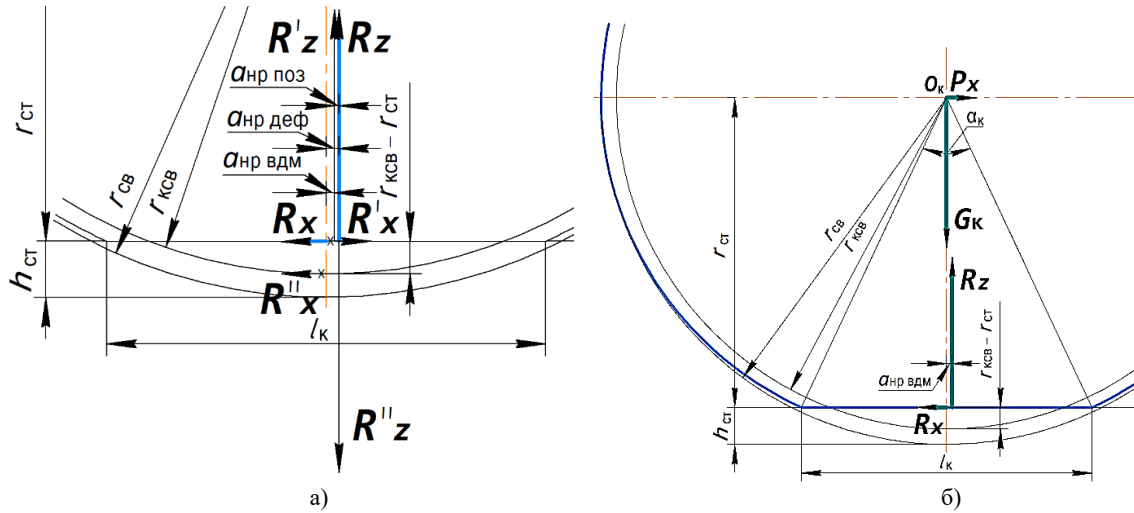


Рис. 4 – Схема действия пар сил с приведением продольной реакции к статическому радиусу и смещением нормальной реакции

При замещении пар сил соблюдено условие равенства моментов

$$R''_x (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}) = R_x (r_{\text{к св}} - r_{\text{ст}}) = R'_z a_{\text{нр поз}} = R_z a_{\text{нр поз}}. \quad (15)$$

Уравнение моментов при действии двух силовых пар – продольной силы P_x и реакции R_x , а также нормальной силы G_k и реакции R_z , – в соответствии со схемой на рисунке 4, б определяется выражением

$$R_x r_{\text{ст}} = R_z a_{\text{нр вдм}}, \quad (16)$$

или, при интерпретации разности смещений центра нормальной реакции опорной поверхности, представленной выражением

$$a_{\text{нр вдм}} = a_{\text{нр деф}} - a_{\text{нр поз}}, \quad (17)$$

как совокупного смещения центра нормальной реакции опорной поверхности при качении колеса в ведомом режиме, обусловленного совместным действием момента сопротивления деформации шины $M_{\text{деф}}$, продольной толкающей силы P_x и продольной реакции опорной поверхности R_x ,

$$R_x r_{\text{ст}} = R_z (a_{\text{нр деф}} - a_{\text{нр поз}}). \quad (18)$$

Поскольку справедливо равенство (20), вытекающее из уравнений (5) и (6),

$$R_z a_{\text{нр деф}} = M_{\text{деф}}, \quad (19)$$

из выражения (18) получим

$$R_x r_{\text{ст}} = M_{\text{деф}} - R_z a_{\text{нр поз}}. \quad (20)$$

Левая часть уравнения – это момент от пары сил, – продольной толкающей силы P_x и продольной реакции R_x опорной поверхности, действующих на плече, отождествляемом со статическим радиусом шины $r_{\text{ст}}$. Вторая составляющая правой части уравнения – это момент от пары сил, – нормальной нагрузки на колесо G_k и нормальной реакции опорной поверхности R_z , действующих на плече $a_{\text{нр поз}}$, интерпретируемом как позиционное смещение центра нормальной реакции опорной поверхности при несимметричной форме эпюры элементарных нормальных реакций, обусловленное действием продольной толкающей силы P_x и продольной реакции опорной поверхности R_x .

С учетом соотношения (11) между продольной реакцией опорной поверхности R_x и моментом сопротивления деформации шины $M_{\text{деф}}$ уравнение (20) приобретает вид

$$R_z a_{\text{нр поз}} = M_{\text{деф}} - \frac{M_{\text{деф}} r_{\text{ст}}}{r_{\text{к св}}}. \quad (21)$$

Из выражения (21) определяется позиционное смещение центра нормальной реакции опорной поверхности

$$a_{\text{нр поз}} = \frac{M_{\text{деф}}}{R_z} \left(1 - \frac{r_{\text{ст}}}{r_{\text{к св}}} \right). \quad (22)$$

Совокупное смещение можно выразить непосредственно из уравнения (16) в соответствии со схемой на рисунке 4, б

$$a_{\text{нр вдм}} = \frac{R_x r_{\text{ст}}}{R_z}, \quad (23)$$

или, с учетом соотношения (11),

$$a_{\text{нр вдм}} = \frac{M_{\text{деф}} r_{\text{ст}}}{R_z r_{\text{к св}}}. \quad (24)$$

Уравнение (11) может быть представлено в развернутом виде при параллельном переносе продольной реакции R_x с приведением условной линии ее действия к радиусу качения колеса в ведомом режиме и при введении в рассмотрение эквивалентной пары сил R'_x и R''_x на плече $h = (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}})$ (рис. 5)

$$R_x r_{к\text{вдм}} = M_{\text{деф}} + R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}}), \quad (25)$$

где $r_{к\text{вдм}}$ – радиус качения колеса в ведомом режиме.

Это уравнение отображает взаимосвязь между силовыми и условными геометрическими параметрами шины для определения составляющих мощностного и энергетического балансов при качении колеса в ведомом режиме.

Полученный набор уравнений и зависимостей, в сочетании с методикой [15], учитывающей несимметричность эпюры нормальных реакций опорной поверхности контактной площадки шины, позволяет определять необходимые силовые и кинематические параметры для моделирования качения колеса в свободном и ведомом режимах.

Представляет интерес энергетическая оценка процессов качения колеса в свободном и ведомом режимах с использованием для этой цели выражений (11) и (25) соответственно.

При обоюдном умножении этих выражений на угловую скорость вращения колеса получим мощность, затрачиваемую на качение шины в свободном и ведомом режиме соответственно

$$N_{к\text{св}} = M_{\text{деф}} \omega_k, \quad (26)$$

$$N_{к\text{вдм}} = R_x r_{к\text{вдм}} \omega_k = M_{\text{деф}} \omega_k + R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}}) \omega_k, \quad (27)$$

где ω_k – угловая скорость вращения колеса вокруг своей оси.

Из сопоставления выражений (26) и (27) следует, что мощность при качении колеса в ведомом режиме больше, чем при качении в свободном режиме, на величину

$$\Delta N_k = R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}}) \omega_k. \quad (28)$$

При умножении выражений (11) и (25) на некоторый фиксированный угол поворота колеса ϕ_k , например на угол α_k контакта беговой дорожки шины с опорной поверхностью, получим работу, затраченную на качение шины в свободном и ведомом режиме соответственно

$$A_{к\text{св}} = M_{\text{деф}} \alpha_k, \quad (29)$$

$$A_{к\text{вдм}} = R_x r_{к\text{вдм}} \alpha_k = M_{\text{деф}} \alpha_k + R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}}) \alpha_k. \quad (30)$$

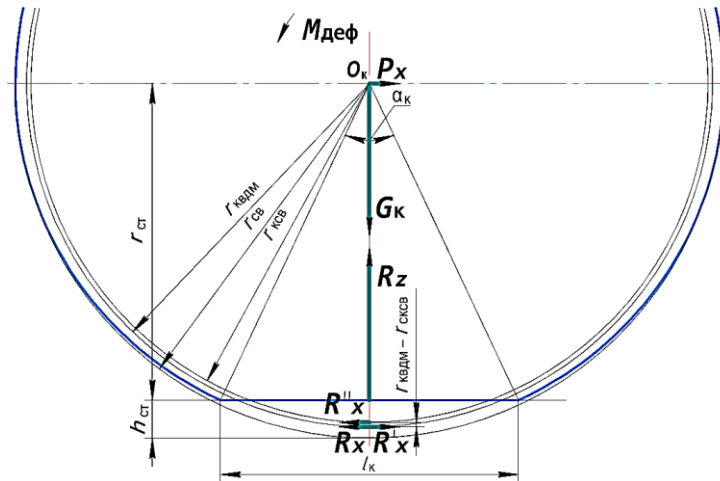


Рис. 5 – Схема действия пары сил и момента с приведением продольной реакции к радиусу качения в ведомом режиме

Расстояние, пройденное колесом при повороте на угол α_k , составляет соответственно в свободном режиме

$$S_{\alpha\text{св}} = \alpha_k r_{к\text{св}}, \quad (31)$$

и ведомом режиме

$$S_{\alpha\text{вдм}} = \alpha_k r_{к\text{вдм}}. \quad (32)$$

Работа, затраченная на единицу пройденного расстояния при качении колеса соответственно в свободном и ведомом режиме

$$A_{к\text{пр св}} = \frac{M_{\text{деф}} \alpha_k}{\alpha_k r_{к\text{св}}} = \frac{M_{\text{деф}}}{r_{к\text{св}}}, \quad (33)$$

$$A_{к\text{пр вдм}} = \frac{M_{\text{деф}} \alpha_k + R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}}) \alpha_k}{\alpha_k r_{к\text{вдм}}} = \frac{M_{\text{деф}} + R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}})}{r_{к\text{вдм}}}. \quad (34)$$

Отношение сравниваемых работ представлено выражением

$$\frac{A_{к\text{пр вдм}}}{A_{к\text{пр св}}} = \frac{M_{\text{деф}} r_{к\text{св}} + R_x (r_{к\text{вдм}} - r_{к\text{св}}) r_{к\text{св}}}{r_{к\text{вдм}} M_{\text{деф}}}. \quad (35)$$

С учетом зависимости (11) в результате преобразования получим соотношение работ, равное единице

$$\frac{A_{к\text{пр вдм}}}{A_{к\text{пр св}}} = \frac{r_{к\text{св}}}{r_{к\text{вдм}}} + 1 - \frac{r_{к\text{св}}}{r_{к\text{вдм}}} = 1. \quad (36)$$

Это означает, что работа, затраченная на качение колеса в свободном и ведомом режимах из расчета на единицу пройденного расстояния, одинакова.

Коэффициент сопротивления качению колеса в ведомом режиме определяется выражениями (37–39), последовательно приводящими к пропорциональному силовому соотношению (40)

$$f_{\text{к в д м}} = \frac{M_{\text{деф}} \alpha_{\text{к}}}{R_z r_{\text{к в д м}} \alpha_{\text{к}}} + \frac{R_x}{R_z} \frac{(r_{\text{к в д м}} - r_{\text{к с в}}) \alpha_{\text{к}}}{r_{\text{к в д м}} \alpha_{\text{к}}}, \quad (37)$$

$$f_{\text{к в д м}} = \frac{M_{\text{деф}}}{R_z r_{\text{к в д м}}} + \frac{R_x}{R_z} \frac{r_{\text{к в д м}} - r_{\text{к в б}}}{r_{\text{к в д м}}}, \quad (38)$$

$$f_{\text{к в д м}} = \frac{a_{\text{н р д е ф}}}{r_{\text{к в д м}}} + \frac{R_x}{R_z} - \frac{R_z}{R_z} \frac{a_{\text{н р д е ф}}}{r_{\text{к в д м}}}, \quad (39)$$

$$f_{\text{K ВДМ}} = \frac{R_x}{R_z} . \quad (40)$$

В знаменателе формулы (37) отображается линейное перемещение крайней передней точки беговой дорожки шины относительно исходного положения оси колеса в момент начала отсчета при поступательном движении, в положение, соответствующее крайней задней точке беговой дорожки шины, с учетом ее дополнительного линейного перемещения вследствие продольного скольжения в направлении поступательного движения оси колеса, при его повороте на угол α_k , равный углу контакта беговой дорожки шины с опорной поверхностью.

Это перемещение отождествляется с расстоянием, пройденным осью колеса при его повороте на угол α_k ,

$$l_{\text{K BDM } \alpha_\nu} = r_{\text{K BDM}} \alpha_\nu. \quad (41)$$

С учетом выражения (16) после преобразования формулы (40) коэффициент сопротивления качению колеса в ведомом режиме может быть определен простым геометрическим отношением

$$f_{\text{к в д м}} = \frac{a_{\text{н р в д м}}}{r_{\text{с т}}}. \quad (42)$$

Полученное выражение (40) соответствует определению коэффициента сопротивления качению колеса в соответствии с пунктом 74 ГОСТ 17697–72 [16], представляемого в качестве условной количественной характеристикой сопротивления качению колеса, равной отношению силы сопротивления качению колеса к его нормальной нагрузке,

$$f_{\text{K BDM}} = \frac{P_x}{G_x}. \quad (43)$$

В свою очередь, сила сопротивления качению колеса, в соответствии с пунктом 73 ГОСТ 17697-72 [16], также является условной количественной характеристикой сопротивления качению колеса, имеющей размерность силы и равной отношению момента сопротивления качению колеса к радиусу качения без скольжения.

А это значит, что коэффициент сопротивления качению колеса в свободном режиме может быть выражен отношением

$$f_{\text{K CB}} = \frac{M_{\text{деф}}}{r_{\text{K CB}} G_{\text{K}}}. \quad (44)$$

С учетом отношения (19) формула приобретает вид

$$f_{\text{KCB}} = \frac{a_{\text{HР деф}}}{r_{\text{KCB}}}. \quad (45)$$

Формулы (40), (42) и (45) дают одинаковый результат, означающий, что коэффициенты сопротивления качению колеса в ведомом и свободном режимах численно равны друг другу.

С учетом выражений (12), (15), (16), (40), (42) и (45) выполняется условие равенства отношений

$$f_{k \text{ ВДМ}} = f_{k \text{ СВ}} = \frac{a_{\text{нр деф}}}{r_{k \text{ СВ}}} = \frac{a_{\text{нр поз}}}{r_{k \text{ СВ}} - r_{\text{СТ}}} = \frac{a_{\text{нр ВДМ}}}{r_{\text{СТ}}} = \frac{R_x}{R_z} = \frac{P_x}{G_x}. \quad (46)$$

Представляется возможным определение радиуса качения колеса в ведомом режиме с использованием пропорционального соотношения (47) компонентов смещений нормальной реакции опорной поверхности и разностей радиусов, выступающих в качестве катетов двух подобных прямоугольных треугольников, вершины которых отмечены точками на схеме (рисунок 6), с взаимно параллельными сторонами,

$$\frac{a_{\text{нр поз}}}{a_{\text{нр деф}}} = \frac{r_{\text{к в д м}} - r_{\text{к с в}}}{r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}}}. \quad (47)$$

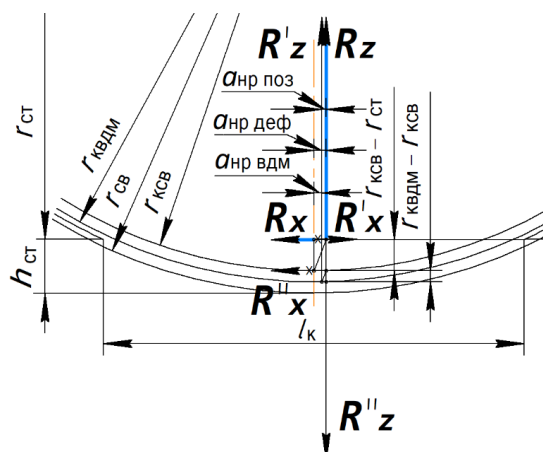


Рис. 6 – Схема пропорциональности продольных смещений нормальной реакции опорной поверхности и разности радиусов

Из отношения (47) следует выражение для определения радиуса качения колеса в ведомом режиме

$$r_{\text{к в д м}} = r_{\text{к с в}} + \frac{a_{\text{нр поз}}}{a_{\text{нр деф}}} (r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}}). \quad (48)$$

Из выражения (15) и пропорционального соотношения (47) следует

$$\frac{a_{\text{нр поз}} R_z}{a_{\text{нр деф}} R_z} = \frac{(r_{\text{к в д м}} - r_{\text{к с в}}) R_x}{(r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}}) R_x}, \quad (49)$$

или с учетом зависимостей (12) и (15)

$$\frac{r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}}}{r_{\text{к с в}}} = \frac{r_{\text{к в д м}} - r_{\text{к с в}}}{r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}}}. \quad (50)$$

Поскольку справедливы уравнения (18) и (20), из пропорционального соотношения (50) после преобразования выражения (51) получим формулу (52) для определения радиуса качения колеса в ведомом режиме

$$\frac{R_x (r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}})}{M_{\text{деф}}} = \frac{r_{\text{к в д м}} - r_{\text{к с в}}}{r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}}}, \quad (51)$$

$$r_{\text{к в д м}} = r_{\text{к с в}} + \frac{(r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}})^2}{M_{\text{деф}}} R_x. \quad (52)$$

Из выражения (52) с учетом соотношения (11) получим выражение, содержащее три расчетных радиуса в качестве геометрических параметров, отображающих величины плеч действия пар условных и действительных сил и реакций

$$r_{\text{к в д м}} = r_{\text{к с в}} + \frac{(r_{\text{к с в}} - r_{\text{с т}})^2}{r_{\text{к с в}}}. \quad (53)$$

Из выражения (53) следует квадратное уравнение для определения радиуса качения колеса в свободном режиме при известных экспериментальных значениях статического радиуса и радиуса качения колеса в ведомом режиме, более доступных для измерения и расчета,

$$2 r_{\text{к с в}}^2 - (2 r_{\text{с т}} + r_{\text{к в д м}}) r_{\text{к с в}} + r_{\text{с т}}^2 = 0. \quad (54)$$

Решением квадратного уравнения является его корень

$$r_{\text{к с в}} = \frac{(2 r_{\text{с т}} + r_{\text{к в д м}}) + \sqrt{(2 r_{\text{с т}} + r_{\text{к в д м}})^2 - 8 r_{\text{с т}}^2}}{4}. \quad (55)$$

Следует иметь в виду, что полученные взаимосвязанные выражения (53) и (55) для определения радиусов качения колеса соответственно в ведомом и свободном режиме справедливы для принятого условия пропорциональности (47).

Результаты и обсуждение. В качестве примера выполнен расчет силовых и геометрических соотношений для автомобильного колеса с шиной 11,0-R20 Pirelli при следующих исходных данных [17, 18]:

- нормальная нагрузка на колесо $G_k = 29,63$ кН;
 - давление воздуха в шине $p_w = 0,725$ Мпа;
 - динамический (статический) радиус колеса при нормальной (вертикальной) нагрузке и соответствующем этой нагрузке внутреннем давлении воздуха в шине $r_{\text{с т}} = 0,498$ м;
 - статический нормальный прогиб шины $h_{\text{с т}} = 43,0$ мм = 0,043 м;
 - длина контактной площадки шины $l_{\text{кп}} = 436,0$ мм = 0,436 м;
 - центральный угол контакта беговой дорожки шины с твердой опорной поверхностью $\alpha_k = 0,826$ рад;
- Радиус качения колеса в свободном режиме [19]

$$r_{\text{к с в}} = \frac{l_{\text{кп}}}{\alpha_k}, \quad (56)$$

$$r_{\text{к с в}} = \frac{0,436}{0,826} = 0,528 \text{ м}.$$

Момент сопротивления деформации шины при качении колеса [19]

$$M_{\text{деф}} = \frac{G_k h_{\text{с т}}}{2 \pi}, \quad (57)$$

$$M_{\text{деф}} = \frac{29,63 \cdot 0,043}{2 \pi} = 0,203 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления деформации шины $M_{\text{деф}}$ при качении колеса в свободном режиме преодолевается приложенным к колесу крутящим моментом $M_k = M_{\text{деф}} = 0,203$ кН · м.

Продольная реакция опорной поверхности шины в ведомом режиме качения колеса, полученная из выражения (11), составляет

$$R_x = \frac{0,203}{0,528} = 0,3844 \text{ кН} = 0,3844 \text{ кН}.$$

Деформационное смещение центра нормальной реакции, соответствующее качению колеса в свободном режиме, полученное из выражения (9), составляет

$$a_{\text{нр деф}} = 0,00646 + 0,000389 = 0,00685 \text{ м} = 6,85 \text{ мм}.$$

Позиционное смещение центра нормальной реакции опорной поверхности $a_{\text{нр поз}}$ в ведомом режиме качения колеса в соответствии с выражением (16) составляет

$$a_{\text{нр поз}} = \frac{0,203}{29,63} \left(1 - \frac{0,498}{0,528} \right) = 0,000389 \text{ м} = 0,389 \text{ мм}.$$

Совокупное смещение центра нормальной реакции опорной поверхности шины, определенное по формуле (24), составляет

$$a_{\text{нр вdm}} = \frac{0,203 \cdot 0,498}{29,63 \cdot 0,528} = 0,00646 \text{ м} = 6,46 \text{ мм.}$$

Из пропорционального соотношения (41) между геометрическими и силовыми параметрами колеса получим одинаковый результат

$$\frac{0,00685}{0,528} = \frac{0,000389}{0,528 - 0,498} = \frac{0,00646}{0,498} = \frac{0,3844}{29,63} = 0,01297 \approx 0,0130.$$

Радиус качения колеса в ведомом режиме по формуле (48) составляет

$$r_{\text{к вdm}} = 0,528 + \frac{(0,528 - 0,498)^2}{0,528} = 0,5297 \text{ м} \approx 0,530 \text{ м.}$$

Расчет показывает, что радиус качения колеса в ведомом режиме превышает радиус качения колеса в свободном режиме на 0,379 %.

По оценке А.Б. Дик [20], применительно к автомобильным шинам, радиус качения колеса в свободном режиме находится в соотношении с радиусом качения в ведомом режиме в достаточно узких пределах

$$r_{\text{к св}} = (0,9988 \div 0,9992) r_{\text{к вdm}}. \quad (58)$$

В пересчете на относительную величину отклонение радиуса качения колеса в ведомом режиме от радиуса качения в свободном режиме составляет

$$\varepsilon_{r_{\text{к вdm}}} = \frac{1 - (0,9988 \dots 0,9992)}{0,9988 \dots 0,9992} 100 \% = (0,12 \dots 0,08) \% \approx 0,10 \ \%.$$

Следует признать, что сравнительные результаты расчетов радиусов качения приемлемо согласуются друг с другом.

Коэффициенты сопротивления качению колеса в ведомом и свободном режимах, полученные по формулам (34) и (38), имеют одинаковые численные значения соответственно

$$f_{\text{к вdm}} = \frac{0,3844}{29,63} = 0,01297 \approx 0,0130.$$

$$f_{\text{к св}} = \frac{0,203}{0,528 \cdot 29,63} = 0,01297 \approx 0,0130.$$

Эти значения также равны численным значениям, полученным из пропорционального соотношения (46). Из равенства результатов следует, что любое из пяти отношений выражения (46) определяет коэффициент сопротивления качению колеса в ведомом режиме, причем первые три – в геометрической форме, а последние два – в силовой.

Выводы. Аналитические выражения для составления уравнений силовых, мощностных, энергетических балансов и геометрических соотношений при качении колеса в свободном и ведомом режимах, полученные в соответствии с трансформируемыми эквивалентными схемами действия момента и пар сил, свидетельствуют о возможности и необходимости совместного использования в качестве определяющих геометрических параметров двух радиусов – радиуса качения колеса в свободном режиме $r_{\text{к св}}$ и статического радиуса колеса $r_{\text{ст}}$.

Применение аксиом теоретической механики об эквивалентности моментов пар сил позволяет осуществлять переход от уравнений силового баланса к уравнениям мощностного и энергетического балансов с учетом всех входящих в них составляющих без ущерба для обеспечения однозначности и определенности.

Библиография

1. Петрушов В.А. К вопросу о качении эластичного колеса по твердой опорной поверхности // Автомобильная промышленность. 1963. № 12. С. 5–9.
2. Петрушов В.А., Шуклин С.А., Московкин В.В. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов. М. : Машиностроение. 1975. 225 с.
3. Коптилов В.И. Свободный режим силового нагружения колеса и возможность его реализации // Проблемы функционирования систем транспорта: Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (с международным участием), Тюмень, 05–07 ноября 2014 года. Том 1. Тюмень : Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2014. С. 284–287.
4. Коптилов В.И. О кинематическом и динамическом радиусе колеса с пневматической шиной // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (с международным участием): в 2-х томах, Тюмень, 20–22 декабря 2016 года. Том 1. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2016. С. 191–198.
5. Коптилов В.И. Сопротивление качению упругого колеса при движении по жесткой основе // Механика и процессы управления: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Тюмень, 22 апреля 2015 года / Под ред. О. А. Новоселова. Тюмень : Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. С. 62–67.
6. Коптилов В.И., Пархоменко Л.Б. Анализ уравнений силового и мощностного баланса ведущего колеса автомобиля // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. Т. 3. С. 206–209.
7. Коптилов В.И. Использование кинематического радиуса в механике качения эластичного колеса // Грузовик, 2021. № 5. С. 17–27.
8. Пожидаев С.П. О теории качения эластичного колеса с позиции механики // Автомобильная промышленность, 2014. № 11. С. 16–17.
9. Сергей Пожидаев. Еще раз о радиусах эластичного колеса. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2014 Vol. 16. № 3. 19–25.
10. Пожидаев С.П. Об одной задаче теории качения эластичного колеса с позиций закона сохранения энергии // Достижения науки – агропромышленному производству: Материалы LIII международной научно-технической конференции,

Челябинск, 30 января – 01 февраля 2014 года / Под редакцией П. Г. Свечникова. Том Часть III. Челябинск : Челябинская государственная агроинженерная академия, 2014. С. 168–174.

11. Пожидаев С.П. О причине, приведшей к заблуждению о возможности применения динамического радиуса в теории движения колесных самоходных машин // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2015. С. 302–306.

12. Пожидаев С.П. Еще раз об основах качения эластичного колеса // Автомобильная промышленность. 2020. № 9. С. 24–33.

13. Пожидаев С.П. О теории качения и пятом колесе телеги (начало) // Автомобильная промышленность. 2021. № 6. С. 19–19.

14. Пожидаев С.П. О теории качения и пятом колесе телеги (окончание) // Автомобильная промышленность. 2021. № 7. С. 21–26.

15. Романченко М.И. Моделирование силовых параметров шины на основе переменной эпюры нормальных реакций в свободном и ведомом режимах качения колеса // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2023. № 2(38). С. 40–47.

16. ГОСТ 17697-72. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. М. : Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. 1972. 24 с.

17. Романченко М.И. Моделирование параметров свободного, ведомого и тормозного режимов качения колеса с учетом несимметричности эпюры нормальных реакций // Грузовик. 2021. № 7. С. 31–40.

18. PIRELLI TRUCK & BUS TYRES. TECHNICAL DATA & REGROOVING. *Pirelli-truck-tyre-catalogue.pdf* [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3RzXCh> (Дата обращения: 23.02.2026).

19. Романченко М.И. Определение сопротивления деформации шины при качении колеса на основе параметров радиального прогиба шины // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке: Материалы XXVII Международной научно-производственной конференции, Майский, 12 апреля 2023 года. Том 4. Майский : Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. С. 186–187.

20. Дик А.Б. О радиусе эластичного колеса // Автомобильная промышленность. 2020. № 10. С. 21–28.

References

1. Petrushov V.A. K voprosu o kachenii ehlastichnogo kolesa po tverdoj opornoj poverkhnosti [To the question of rolling the elastic wheel on a solid support surface] // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 1963. № 12. S. 5–9.

2. Petrushov V.A., Shuklin S.A., Moskovkin V.V. Soprotivlenie kacheniyu avtomobilej i avtopoezdov [Rolling resistance of cars and road trains]. M. : Mashinostroenie. 1975. 225 s.

3. Kopotilov V.I. Svobodnyj rezhim silovogo nagruzheniya kolesa i vozmozhnost' ego realizacii [Free mode of wheel load and possibility of its implementation] // *Problemy funkcionirovaniya sistem transporta: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchyonykh (s mezhdunarodnym uchastiem)*, Tyumen', 05–07 noyabrya 2014 goda. Tom 1. Tyumen' : Tyumenskij gosudarstvennyj neftegazovyy universitet, 2014. S. 284–287.

4. Kopotilov V.I. O kinematicheskom i dinamicheskom radiuse kolesa s pnevmaticheskoy shinoj [About the kinematic and dynamic radius of a pneumatic tire wheel] // *Problemy funkcionirovaniya sistem transporta: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchyonykh (s mezhdunarodnym uchastiem): v 2-kh tomakh*, Tyumen', 20–22 dekabrya 2016 goda. Tom 1. Tyumen' : Tyumenskij industrial'nyj universitet, 2016. S. 191–198.

5. Kopotilov V.I. Soprotivlenie kacheniyu uprugogo kolesa pri dvizhenii po zhestkoj osnove [Rolling resistance of the elastic wheel when moving on a rigid base] // *Mekhanika i processy upravleniya: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii*, Tyumen', 22 aprelya 2015 goda / Pod red. O.A. Novoselova. Tyumen' : Tyumenskij gosudarstvennyj neftegazovyy universitet, 2015. S. 62–67.

6. Kopotilov V.I., Parkhomenko L.B. Analiz uravnenij silovogo i moshchnostnogo balansa vedushchego kolesa avtomobilya [Analysis of the equations of power and power balance of the driving wheel of the car] // *Neft' i gaz Zapadnoj Sibiri: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Tyumen': TyuMNGU, 2015. T. 3. S. 206–209.

7. Kopotilov V.I. Ispol'zovanie kinematicheskogo radiusa v mekhanike kacheniya ehlastichnogo kolesa [Using kinematic radius in elastic wheel rolling mechanics] // *Gruzovik*, 2021. № 5. S. 17–27.

8. Pozhidaev S.P. O teorii kacheniya ehlastichnogo kolesa s pozicii mekhaniki [On some refinements of the theory of rolling of an elastic wheel] // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2014. № 11. S. 16–17.

9. Sergej Pozhidaev. Eshche raz o radiusakh ehlastichnogo kolesa [Once again about elastic wheel radii]. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2014 Vol. 16. № 3. 19–25.

10. Pozhidaev S.P. Ob odnoj zadache teorii kacheniya ehlastichnogo kolesa s pozicij zakona sokhraneniya ehnergii [On one problem of the theory of rolling of an elastic wheel from the standpoint of the law of conservation of energy] // *Dostizheniya nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu: Materialy LIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, Chelyabinsk, 30 yanvarya – 01 fevralya 2014 goda / Pod redakciej P. G. Svechnikova. Tom Chast' III. Chelyabinsk : Chelyabinskaya gosudarstvennaya agroinzhenernaya akademiya, 2014. S. 168–174.

11. Pozhidaev S.P. O prichine, privedshej k zabluzhdeniyu o vozmozhnosti primeneniya dinamicheskogo radiusa v teorii dvizheniya kolesnykh samokhodnykh mashin [On the reason that led to the misconception about the possibility of using a dynamic radius in the theory of motion of wheeled self-propelled machines] // *Neft' i gaz Zapadnoj Sibiri: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu so dnya rozhdeniya Kosukhina Anatoliya Nikolaevicha*. Tyumen' : Tyumenskij industrial'nyj universitet, 2015. S. 302–306.

12. Pozhidaev S.P. Eshche raz ob osnovakh kacheniya ehlastichnogo kolesa [Once again about the basics of rolling an elastic wheel] // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2020. № 9. S. 24–33.

13. Pozhidaev S.P. O teorii kacheniya i pyatom kolese telegi (nachalo) [About rolling theory and the fifth wheel of the cart (beginning)] // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2021. № 6. S. 19–19.

14. Pozhidaev S.P. O teorii kacheniya i pyatom kolese telegi (okonchanie) [About rolling theory and the fifth wheel of the cart (ending)] // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2021. № 7. S. 21–26.

15. Romanchenko M.I. Modelirovanie silovykh parametrov shiny na osnove peremennoy ehpyury normal'nykh reakcij v svobodnom i vedomom rezhimakh kacheniya kolea [Modeling of tire power parameters based on variable diagram of normal reactions in free and driven modes of wheel rolling] // *Innovacii v APK: problemy i perspektivy*. 2023. № 2(38). S. 40–47.
16. GOST 17697-72. Avtomobili. Kachenie kolea. Terminy i opredeleniya [GOST 17697-72. Cars. Wheel rolling. Terms and definitions]. M. : Gosudarstvennyj komitet standartov Soveta Ministrov SSSR, 1972. 24 s.
17. Romanchenko M.I. Modelirovanie parametrov svobodnogo, vedomogo i tormoznogo rezhimov kacheniya kolea s uchedom nesimmetrichnosti ehpyury normal'nykh reakcij [Simulation of parameters of free, driven and braking modes of wheel rolling taking into account asymmetry of the diagram of normal reactions] // *Gruzovik*, 2021. № 7. S. 31–40.
18. PIRELLI TRUCK & BUS TYRES. TECHNICAL DATA & REGROOVING. [Pirelli-truck-tyre-catalogue.pdf](https://clck.ru/3RzXCh) [Electronic resource]. URL: <https://clck.ru/3RzXCh> (data obrashcheniya: 23.02.2026).
19. Romanchenko M.I. Opredelenie soprotivleniya deformacii shiny pri kachenii kolea na osnove parametrov radial'nogo progiba shiny [Determination of tire deformation resistance during wheel rolling on the basis of tire radial drive parameters] // *Vyzovy i innovacionnye resheniya v agrarnoj nauke: Materialy XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-proizvodstvennoj konferencii, Majskij, 12 aprelya 2023 goda. Tom 4. Majskij : Belgorodskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni V.YA. Gorina*, 2023. S. 186–187.
20. Dik A.B. O radiuse ehlastichnogo kolea [About elastic wheel radius] // *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2020. № 10. S. 21–28.

Сведения об авторах

Романченко Михаил Иванович, кандидат технических наук, доцент инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +7 4722 39-29-35, e-mail: romanchenko_mi@belgau.ru;

Новицкий Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +7 4722 39-29-35, e-mail: novickij_as@belgau.ru.

Information about authors

Romanchenko Mikhail Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor of the faculty of engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, p. Mayskiy, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, phone +7 4722 39-29-35, e-mail: romanchenko_mi@belgau.ru;

Novitsky Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, associate professor of the faculty of engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, p. Mayskiy, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, phone +7 4722 39-29-35, e-mail: novickij_as@belgau.ru.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОНОМИИ

УДК 574.4:633.367.3:631.417

В.И. Желтухина, Е.Ю. Колесниченко, Е.Г. Котлярова, А.А. Муравьев

МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ ЦЕНОПОПУЛЯЦИИ ЛЮПИНА БЕЛОГО (LAT. LUPINUS ALBUS) ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ В ПОЧВЕ

Аннотация. Кормовой белок – один из основных составляющих кормовой базы сельскохозяйственных животных. Интенсификация производительности кормовых протеинов – единственный путь решения белковой проблематики. Себестоимость производства растительного белка значительно ниже по сравнению с животным. Бобовые культуры как источник полноценного белка являются наиболее перспективным производством растениеводческой отрасли. Производство растительного белка имеет выгодную экономическую составляющую при добавлении его в кормовой рацион. Азотфиксирующая способность бобовых ликвидирует дефицит почвенного азота. При внесении органических удобрений в почву также повышается плодородие почвы и улучшается питание растений.

Исследования, проведенные нами на опытном участке, позволили определить оптимальную дозу органических удобрений при разных уровнях внесения. Объект исследования: Люпин белый (лат. *Lupinus albus*) – вид травянистых растений из рода Люпин семейства Бобовые. Объект исследования – люпин белый сорта «Дегга».

Основываясь на морфометрических показателях вегетативных и генеративных органов люпина белого, наилучшие показатели были во втором варианте.

Аллометрические показатели, которые оценивают соотношение разных частей растения, также подтверждают сделанный вывод об оптимальности условий во втором варианте опыта. Низкие коэффициенты относительной площади листьев, фотосинтетического усилия на фоне высоких показателей репродуктивного усилия люпина делянки с уровнем органических удобрений 10 т/га свидетельствует о продуктивной направленности жизненной стратегии этих растений. Отсутствие удобрений так же, как и высокая их доза можно рассматривать как фактор, вызывающий изменение виталитета растений – выживание в неблагоприятных условиях оказывается важнее репродукции.

Ключевые слова: люпин белый, удобрения, морфометрические показатели.

MORPHOMETRIC ASSESSMENT OF THE STABILITY OF DEVELOPMENT OF THE COENOPULATION OF WHITE (LUPINUS ALBUS) AT DIFFERENT LEVELS OF ORGANIC FERTILIZERS IN THE SOIL

Abstract. Feed protein is one of the main components of the feed base for farm animals. Intensifying feed protein productivity is the only way to solve the protein problem. The production cost of plant protein is significantly lower than that of animal protein. Legumes, as a source of complete protein, are the most promising crop in the crop production industry. Plant protein production offers economic benefits when added to feed rations. The nitrogen-fixing capacity of legumes eliminates soil nitrogen deficiency. Adding organic fertilizers to the soil also increases soil fertility and improves plant nutrition.

Research conducted on a test plot allowed us to determine the optimal dose of organic fertilizer at different application rates. The object of the study: white lupine (*Lupinus albus*) is a species of herbaceous plant from the genus *Lupinus* in the legume family. The object of the study was the white lupine cultivar 'Dega'.

Based on morphometric parameters of the vegetative and reproductive organs of white lupine, the best results were achieved in the second variant.

Allometric parameters, which assess the ratio of different plant parts, also confirm the conclusion that the conditions in the second experimental variant were optimal. Low relative leaf area and photosynthetic effort coefficients, coupled with high reproductive effort in the lupine plot with an organic fertilizer level of 10 t/ha, indicate a productive orientation of the life strategy of these plants. The lack of fertilizers, as well as their high dose, can be considered as a factor causing changes in plant vitality – survival in unfavorable conditions turns out to be more important than reproduction.

Keywords: white lupine, fertilizers, morphometric parameters.

Введение. В условиях современного развития сельскохозяйственного производства на территории Белгородской области необходимо учитывать потребности в кормовом белке в животноводстве. При выращивании люпина присутствует возможность данным пищевым продуктом удовлетворить эти нужды. Возделывая люпин на сельскохозяйственных угодьях, возобновляется азот в почве. Гарантированное поступление полноценного белка в кормовой рацион всех видов животных и птицы является неоспоримым приоритетом современного кормопроизводства. Требования современной экономической модели включают такие факторы, как эффективность и экологическая целесообразность сельскохозяйственного производства. Рациональное, полномасштабное использование растительных ресурсов, экологизация земледелия и кормопроизводства наиболее реалистичный подход решения данной проблемы [1, 2].

Интенсификация производительности кормовых протеинов – единственный путь решения белковой проблематики. Себестоимость производства растительного белка значительно ниже по сравнению с животным. Бобовые культуры как источник полноценного белка являются наиболее перспективным производством растениеводческой отрасли. По сравнению со злаковыми культурами, в бобовых содержание протеина в 1,5–3 раза выше. Многочисленное видовое разнообразие семейства бобовых дает основание считать его представителей наиболее перспективным объектом культивирования в самых разнообразных природных условиях. Столь же разнообразны количество и качество продуцируемых белков, их пищевая ценность и биологическая усвояемость. Одним из альтернативных вариантов ликвидации белкового дефицита в кормопроизводстве может служить использование в качестве источника протеина люпина белого [3, 4].

© Желтухина В. И., Колесниченко Е. Ю., Котлярова Е. Г., Муравьев А. А., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Азотфиксирующая способность, присущая люпину, выступает главным аргументом обеспечения белкового синтеза за счет азота атмосферы при минимальном изъятии этого элемента из почвы [5, 6].

Изучение параметров функционирования агробиоценозов предполагает обоснование энергетического аспекта в оценке экологической обстановки сельскохозяйственного природопользования. Структурно-функциональные компоненты агроценоза и их вещественно-энергетическое взаимодействие регулируются большим количеством абиотических и биотических факторов, идентифицировать которые возможно только на вероятностном уровне. Для внутренней информационной среды агроценоза материальные носители в виде химических соединений различной природы выступают как сигналы, регулирующие процессы роста и развития растительного организма [7].

Селекционные исследования, направленные на создание новых сортов люпина, должны быть ориентированы на оптимизацию структурной организации растения и ускорения морфофизиологической дифференциации как адаптивный процесс к природным условиям культивирования. В настоящее время можно утверждать о недостаточной степени наших знаний механизмов формирования метаболических реакций на факторы, позволяющие поддерживать высокий уровень продуктивности растений при высокой степени энергоэффективности и экологической устойчивости [8].

Поэтому использование органических удобрений в практике растениеводства, как фактору, повышающему плодородие почвы и улучшающему питание растений, является весьма оправданным и актуальным.

Методы. Объект исследования: Люпин белый (лат. *Lupinus albus*) – вид травянистых растений из рода Люпин семейства Бобовые. Объект исследования – люпин белый сорта «Дега».

Опытная территория характеризуется умеренно-континентальным климатом с теплым летом и сравнительно холодной зимой. По среднегодовым данным метеостанции г. Белгорода, вегетационный период продолжается 187–197 дней. Среднегодовая температура воздуха составляет +5,9 °С. Минимальная температура воздуха отмечена в январе -37 °С, максимальная в июле +40 °С. Переход температуры воздуха через 0 °С наблюдается в третьей декаде марта и второй декаде ноября, через 10 °С – в конце апреля и сентября. Через 5 °С – в первых числах апреля и в конце октября. Число дней с температурой выше 10 °С в среднем за много лет составляет 154 дня.

Среднегодовое количество осадков составляет 450–540 мм, в том числе за период активной вегетации 320 мм. Более половины в году выпадает в виде дождя и лишь одна треть – в виде снега. Сумма положительных температур выше 10 °С составляет 2507°. Гидротермический коэффициент в среднем за период вегетации (апрель–сентябрь) равен 1,0–1,1.

В целом сложившиеся на данной территории климатические условия благоприятны для возделывания большинства районированных сельскохозяйственных культур.

Почвы опытных участков относятся к черноземам типичным, выщелоченным, среднесуглинистым на лёссовидном суглинке. По результатам агрохимического обследования полей среднее содержание в пахотном горизонте доступных питательных веществ составило: гумус 5,1–5,6 %, гидролизующего азота – 15–17, подвижного фосфора – 17–20, обменного калия – 14–18 мг на 100 г почвы; гидролитическая кислотность 3,8–6,1 мг/экв. на 100 г почвы, рН – 5,0–5,6; сумма поглощенных оснований 36,0–41,6 мг/экв. на 100 г почвы при насыщенности основаниями 86,1–91,7%.

Опыт по изучению влияния различных доз птичьего помета на морфофункциональные параметры на люпин проводился по схеме, предусматривающей следующие варианты доз внесения птичьего помета:

1. Контроль (без применения удобрений)
2. Птичий помет 5 т/га (1 вариант)
3. Птичий помет 10 т/га (2 вариант)
4. Птичий помет 15 т/га (3 вариант)

В качестве органического удобрения в опыте использовался птичий помет, поставляемый птицефабрикой «Яснозренская».

Для анализа были взяты выборки из 10 растений с каждой делянки. Площадь делянки 16 м².

Результаты. В своих исследованиях использовали две группы признаков метрические и аллометрические. Метрические характеризуют морфометрический статус растения в тот или иной момент времени, тогда как аллометрические оценивают соотношения в развитии разных частей растений.

Метрические показатели. Анализ морфометрических показателей, количественно характеризующих вегетативные и генеративные части растений, совершенно отчетливо выявили явное превосходство второго варианта по сравнению как с контролем, так и с остальными опытными делянками (табл. 1).

Таблица 1 – Метрические показатели люпина белого

№	Показатели	Варианты опыта			
		Контроль	1	2	3
1	Высота растения, см	37,18	38,92	39,52	38,78
2	Число метамеров	6,6	6,8	6,5	6,8
3	Число листовых пластинок	80,3	82,5	87,1	86,8
4	Общая площадь листовой поверхности, см ²	475,6	482,6	551,3	479,8
5	Средняя площадь листовой пластинки	5,92	5,85	6,33	5,53
6	Масса растения, г	20,98	22,93	32,75	28,65
7	Масса листьев, г	5,04	5,42	7,31	6,29
8	Число плодов, шт.	4,6	5,3	8,2	6,2
9	Масса плодов, г	4,84	5,45	9,04	5,91
10	Масса корней, г	3,03	3,46	4,16	3,72

Наиболее значимое различие длины стебля растений было установлено для второго варианта на 2,34 см или на 6,29 % больше контрольных значений. Высота растений в первом и третьем вариантах в меньшей степени отличалась от контроля и составила 1,74 или 4,68 и 1,6 см или 4,3 % соответственно.

Количество листовых пластин также оказалось наибольшим у люпина, выращиваемого на делянке с содержанием куриного помета в дозе 10 т/га (рис. 3). Различия по количеству листовых пластинок в первом варианте составило 2,2 или 2,44; во втором – 6,8 или 7,53; в третьем – 6,5 или 7,2 % по отношению к контролю. Отличие числа метамеров в контроле и опытных вариантах было несущественным.

Общая площадь листовой поверхности в первом варианте была больше на 7,0 см² или на 1,47; во втором – на 75,7 см² или на 15,92; в третьем – на 4,2 см² или на 0,88 % по отношению к контролю (рис. 1).

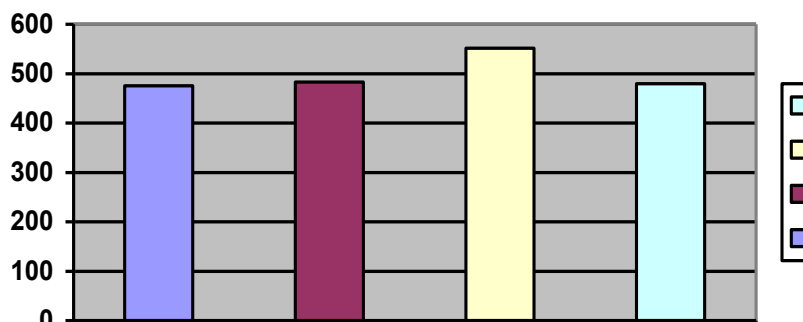


Рис. 1 – Общая площадь листовой поверхности, см²

Различия средней площади листовых пластинок лишь во втором варианте превысило контрольные значения на 0,41 см² или на 6,92 %; в первом и третьем вариантах этот показатель был на незначительную величину ниже контроля на 0,07 или на 1,2 и на 0,39 см² или на 7,05 % (рис. 2).

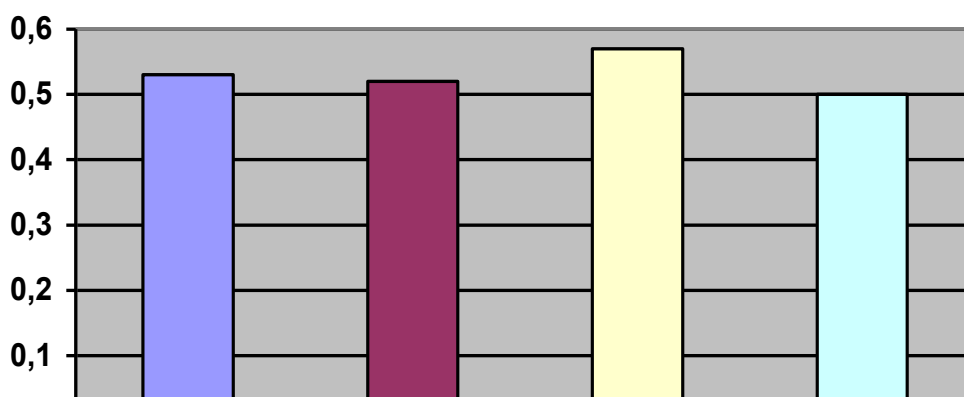


Рис. 2 – Средняя площадь листовой пластинки, см²

Реакция люпина на внесение куриного помета сопровождалась ростом общей массы растений. Этот прирост для первого варианта составил 1,95 или 9,29; для второго – 11,77 или 56,1; для третьего – 7,67 г или 36,56 % по сравнению контролем (рис. 3).

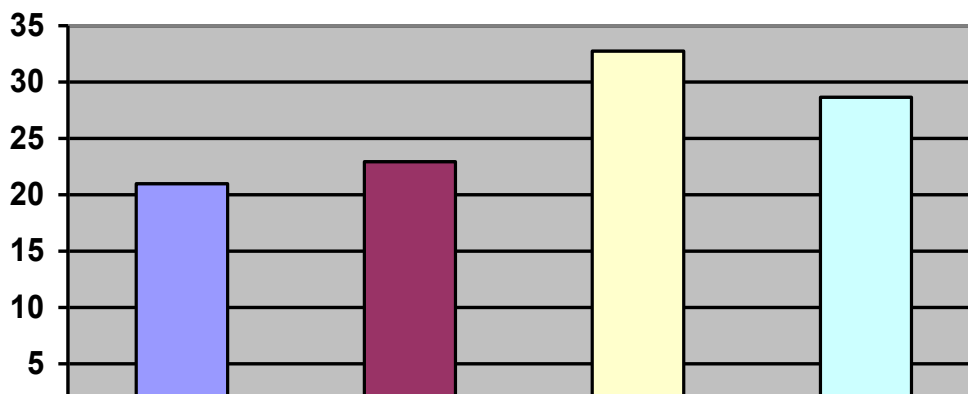


Рис. 3 – Масса растения, г

Масса листьев после применения органических удобрений также возросла и по вариантам распределилась следующим образом: в первом различие составило 0,38 или 7,54; во втором – 2,27 или 45,04; в третьем – 1,25 г или 24,8 % по сравнению бобами контрольной делянки. (рис. 4).

Реакция люпина на использование куриного помета сопровождалась ростом показателей, характеризующих генеративные органы растений. Число плодов в первом варианте было на 0,7 или на 15,22; во втором – на 3,6 или на 78,26; в третьем – на 1,6 или на 34,78 % больше, чем у люпина контрольной делянки.

Масса плодов так же, как и их число была наибольшей во втором варианте на 4,2 г или в 86,78 %; для первого варианта это различие составило 0,61 или на 12,6; для третьего – на 1,07 г или на 22,11 % больше, чем в контроле.

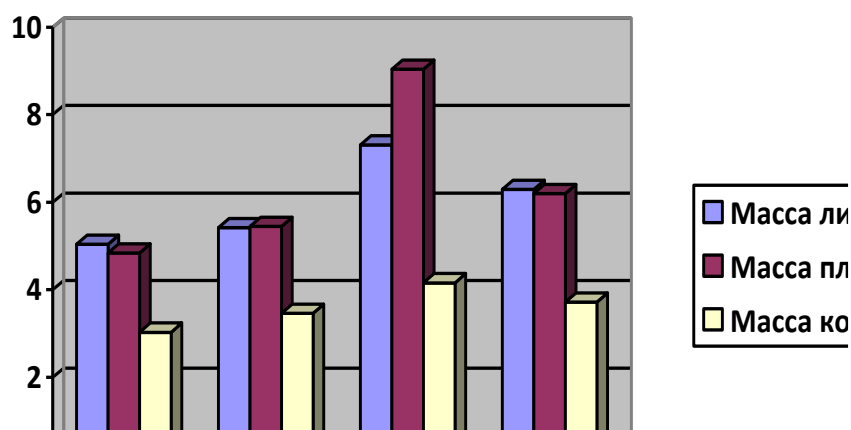


Рис. 4 – Масса листьев, плодов, корней, г

Не стала исключением реакция корневой системы люпина на внесение в почву органического удобрения: в первом варианте масса корней была на 0,43 или на 14,19; во втором – на 1,13 или на 37,29; в третьем – на 0,69 г или на 22,77 % больше по отношению контрольным показателям.

Оценка эколого-ценотических и онтогенетических стратегий растений может быть дана при анализе морфологических характеристик как реакция на изменение эдафических факторов. Аллометрические показатели, характеризующие соотношение в развитии разных частей растений, как реакция на разные уровни обеспеченности их органическими удобрениями представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Аллометрические показатели люпина

№	Показатели	Варианты опыта			
		Контроль	1	2	3
1	Относительная площадь листьев	22,67	21,05	16,83	16,75
2	Отношение площади листьев к их массе	94,36	89,04	75,41	76,28
3	Фотосинтетическое усилие, %	0,24	0,24	0,22	0,22
4	Репродуктивное усилие I, %	0,23	0,24	0,28	0,21
5	Репродуктивное усилие II, %	0,01	0,011	0,016	0,012

Последовательное увеличение вносимой дозы куриного помета сопровождалось снижением показателя относительной площади листьев люпина по сравнению с контрольными значениями: в первом варианте на 1,62 или на 7,7; во втором – на 5,84 или на 34,7; в третьем – на 5,92 или на 35,34 % (рис. 5).

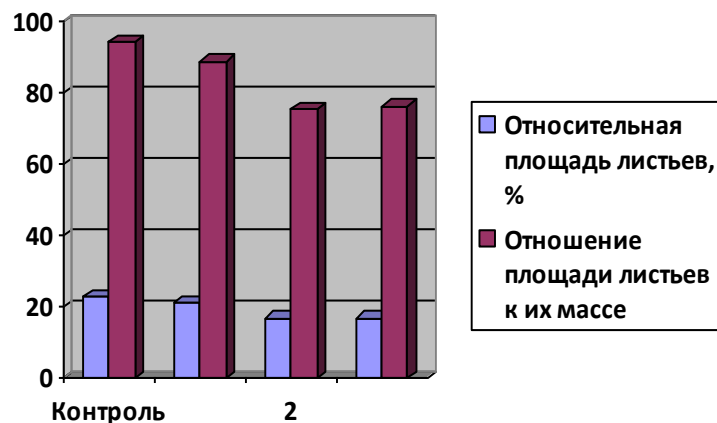


Рис. 5 – Относительная площадь листьев, отношение площади листьев к их массе

Расчетная величина отношения площади листьев к их массе во всех вариантах опыта также оказалась ниже контрольных значений (рис. 5). Так, в первом варианте это различие составило 5,32 или 5,97; во втором – 18,95 или 25,13 и в третьем 18,08 или 23,7 %.

Фотосинтетическое усилие растений в первом варианте опыта осталось на уровне контроля, во втором и третьем вариантах было отмечено снижение этого коэффициента на одинаковую величину 0,02 или на 9,1 % (рис. 6).

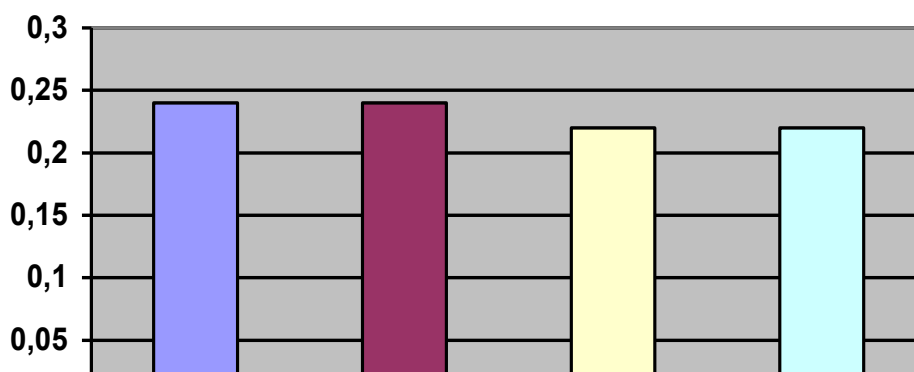


Рис. 6 – Фотосинтетическое усилие

Параметры репродуктивного усилия I достигли своего максимального значения во втором варианте, превысив на 0,05 или на 21,74 % уровень контроля, тогда как в первом варианте этот показатель оказался на 0,01 или на 4,35 % выше, а в третьем, наоборот, на 0,02 или на 9,52 % ниже контрольных параметров (рис. 7).

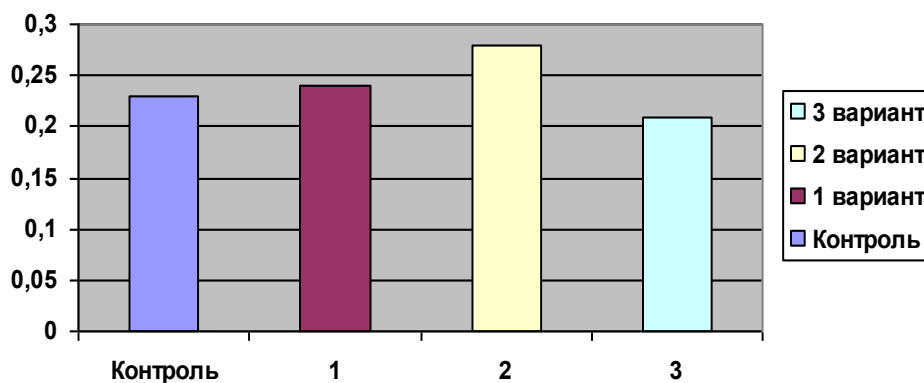


Рис. 7 – Репродуктивное усилие I

Не стало исключением из установленной закономерности и репродуктивное усилие II, так же, как и с репродуктивным усилием I существенные различия с контролем наблюдались для второго варианта на 0,006 или на 60 %; в первом – на 0,001 или на 10,0 %; в третьем – на 0,002 или на 20,0 % (рис. 8).

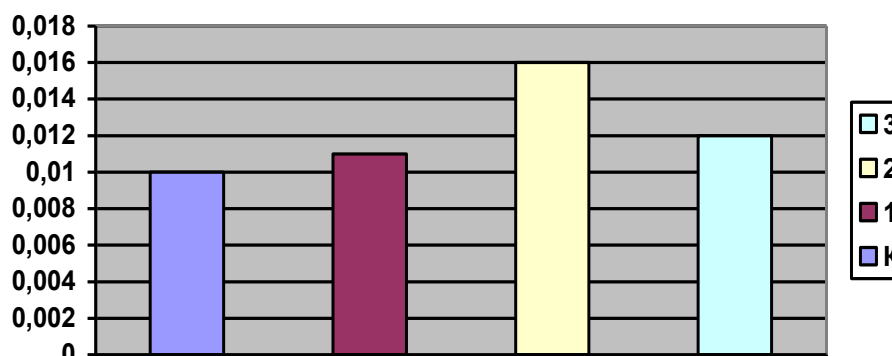


Рис. 8 – Репродуктивное усилие II

Заключение. Таким образом, проведенный морфометрический анализ люпина при разных уровнях обеспеченности растений органическими удобрениями показал, что оптимальной дозой удобрений является 10 т/га. Метрические данные вегетативных и генеративных органов растений второго варианта были явно выше по сравнению как с контролем, так и по отношению к другим опытным группам.

Аллометрические показатели, которые оценивают соотношение разных частей растения, так же подтверждают сделанный вывод об оптимальности условий во втором варианте опыта. Низкие коэффициенты относительной площади листьев, фотосинтетического усилия на фоне высоких показателей репродуктивного усилия люпина делянки с уровнем органических удобрений 10 т/га свидетельствует о продуктивной направленности жизненной стратегии этих растений. Отсутствие удобрений так же, как и высокая их доза 15 т/га можно рассматривать как фактор, вызывающий изменение виталитета растений – выживание в неблагоприятных условиях оказывается важнее репродукции.

Библиография

1. Алдошин Н.В. Особенности уборки белого люпина и производства на его основе кормов / Н. В. Алдошин, А. С. Цыгуткин // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Дальневосточного государственного аграрного университета. В 3 т., Благовещенск, 16–17 апреля 2025 года. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. С. 240–245. DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-240-245. EDN LXJTGN.
2. Ставцев А.Э. Эффективность белкового концентрата на основе белого люпина в кормлении сельскохозяйственных животных, птицы и рыбы в аквакультуре / А. Э. Ставцев, Ю. В. Сошкин, А. С. Цыгуткин // Зоотехническая и ветеринарная наука – основа инновационного развития животноводства России : Сборник статей, по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Института зоотехнии и биологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 06–07 декабря 2024 года. М. : Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. С. 105–110. EDN WOKSMM.
3. Лаврентьева Е.Д. Использование семян белого люпина в кормлении цыплят-бройлеров / Е. Д. Лаврентьева, Е. С. Сарайкин // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Пенза, 28–29 марта 2024 года. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 265–268. EDN GPAFLD.
4. Вардамацкая К.В. Люпин: его роль и значение в агропромышленном комплексе // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 112–6. С. 9–12. DOI 10.18411/trnio-08-2024-286. EDN IUESFE.
5. Забытая высокобелковая кормовая культура / Е. С. Сарайкин, Е. В. Полякова, Г. И. Боряев, Е. Д. Лаврентьева // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых, Пенза, 26–27 октября 2023 года. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 259–262. EDN CYVIJB.
6. Цыгуткин А.С. Содержание азота в зерне сортов белого люпина и его вынос с урожаем // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия : Сборник докладов XVII Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В.В. Докучаева», Курск, 27–29 апреля 2022 года. Курск : Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Курский федеральный аграрный научный центр», 2022. С. 283–287. EDN ETDZRI.
7. Халимуллина А.А. Урожайность люпина белого сорта Дега при внесении минеральных удобрений // Научно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса в реализации Государственной программы развития сельского хозяйства до 2020 года : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Курганской ГСХА имени Т.С. Мальцева, Курган, 18–19 апреля 2019 года / Под общей редакцией С. Ф. Сухановой. Курган : Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2019. С. 784–789. EDN ZQDEUQ.
8. Халимуллина А.А. Влияние минеральных удобрений на продуктивность люпина белого в условиях лесостепи Зауралья / А. А. Халимуллина, А. В. Созинов // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи : Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, Лесниково, 29 ноября 2017 года. Лесниково : Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2017. С. 314–317. EDN YROLEE.

References

1. Aldoshin N.V. Features of harvesting white lupine and producing feed based on it / N. V. Aldoshin, A. S. Tsygutkin // Agro-industrial complex: problems and development prospects: materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Far Eastern State Agrarian University. In 3 volumes, Blagoveshchensk, April 16-17, 2025. Blagoveshchensk : Far Eastern State Agrarian University, 2025. Pp. 240–245. DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-240-245. EDN LXJTGN.

2. Stavtsev A. E. Efficiency of protein concentrate based on white lupine in feeding farm animals, poultry and fish in aquaculture / A. E. Stavtsev, Yu. V. Soshkin, A. S. Tsygutkin // Zootechnical and veterinary science - the basis for innovative development of animal husbandry in Russia: Collection of articles, based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the foundation of the Institute of Animal Science and Biology of the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, December 6-7, 2024. Moscow : Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2024. P. 105–110. EDN WOKSMM.
3. Lavrenteva E.D. Use of white lupine seeds in feeding broiler chickens / E. D. Lavrenteva, E. S. Saraykin // Innovative ideas of young researchers for the agro-industrial complex: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, Penza, March 28-29, 2024. Penza : Penza State Agrarian University, 2024. Pp. 265–268. EDN GPAFLD.
4. Vardamatskaya K.V. Lupine: its role and importance in the agro-industrial complex // Trends in the development of science and education. 2024. № 112–6. Pp. 9–12. DOI 10.18411/trnio-08-2024-286. EDN IUESFE.
5. Forgotten high-protein forage crop / E. S. Saraikin, E. V. Polyakova, G. I. Boryaev, E. D. Lavrentyeva // The contribution of young scientists to the innovative development of the Russian agro-industrial complex: Collection of materials from the International scientific and practical conference of young scientists, Penza, October 26–27, 2023. Penza : Penza State Agrarian University, 2023. Pp. 259–262. EDN CYVIJB.
6. Tsygutkin A.S. Nitrogen content in the grain of white lupine varieties and its removal with the harvest / A. S. Tsygutkin // Actual problems of soil science, ecology and agriculture: Collection of reports of the XVII International scientific and practical conference of the Kursk branch of the IPO «Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev», Kursk, April 27–29, 2022. Kursk : Federal State Budgetary Scientific Institution «Kursk Federal Agrarian Scientific Center», 2022. Pp. 283–287. EDN ETDZRI.
7. Khalimullina A.A. Yield of white lupine variety Dega with the application of mineral fertilizers // Scientific and technical support for the agro-industrial complex in the implementation of the State Program for the Development of Agriculture until 2020: Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, Kurgan, April 18–19, 2019 / Under the general editorship of S.F. Sukhanova. Kurgan : Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, 2019. P. 784–789. EDN ZQDEUQ.
8. Khalimullina A.A. The influence of mineral fertilizers on the productivity of white lupine in the forest-steppe conditions of the Trans-Urals / A. A. Khalimullina, A. V. Sozinov // Development of scientific, creative and innovative activities of youth: Proceedings of the IX All-Russian scientific and practical conference of young scientists, Lesnikovo, November 29, 2017. Lesnikovo : Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, 2017. P. 314–317. EDN YROLEE.

Сведения об авторах

Желтухина Валентина Ивановна, кандидат биологических наук, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел.+74722 39-23-96, e-mail: Zheltuhina_vi@belgau.ru;

Колесниченко Елена Юрьевна, кандидат биологических наук, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел.+74722 39-23-96, e-mail: kolesnichenko_ej@belgau.ru;

Котлярова Екатерина Геннадиевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел.+74722 39-23-96;

Муравьев Александр Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел.+74722 39-23-96.

Information about authors

Zheltukhina Valentina Ivanovna, PhD in Biology, Associate Professor, Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova St., Maysky Village, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, tel.: +74722 39-23-96, e-mail: Zheltuhina_vi@belgau.ru;

Kolesnichenko Elena Yuryevna, PhD in Biology, Associate Professor, Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova St., Vavilova St., 1, Maysky Settlement, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, Tel.: +74722 39-23-96, e-mail: kolesnichenko_ej@belgau.ru;

Kotlyarova Ekaterina Gennadiyevna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova St., 1, Maysky Settlement, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, Tel.: +74722 39-23-96;

Muraviov Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova St., 1, Maysky Settlement, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, Tel.: +74722 39-23-96.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ФЕСТУЛОЛИУМА В ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

Аннотация. С целью разработки и совершенствования технологических приёмов возделывания фестулолиума для формирования высокопродуктивных агрофитоценозов были проведены полевые эксперименты в лесостепной части РСО-Алания в 2024–2025 гг. Территория опытного участка расположена на высоте 520 м над уровнем моря (III агроклиматический район), характеризующийся недостаточным увлажнением. Почва – чернозёмы выщелоченные предкавказские, тяжело-суглинистые, подстилаемые галечником. Объектом исследования служил сорт фестулолиума «Вик-90», предметом исследований – способы посева, нормы высева, а также действие рострегулирующих препаратов различного происхождения – биологический препарат Байкал ЭМ 1, жидкое комплексное органоминеральное удобрение «Гумат калия», природная агоруда «Аланит», парааминобензойная кислота «ПАБК». Установлено, что фестулолиум может представлять значительный интерес для кормопроизводства в Центральном Предкавказье. Сопоставление результатов по способам посева и нормам высева позволило определить рациональные параметры возделывания фестулолиума для кормового направления в лесостепных условиях Республики Северная Осетия-Алания. Наиболее обоснованным вариантом признан ширококядный посев с междурядьями 45 см при норме высева 4 млн растений/га. Предпосевная обработка семян фестулолиума рострегулирующими препаратами различного происхождения способствовала улучшению ряда хозяйственно ценных характеристик культуры. В ходе наблюдений установлено, что к моменту уборки возрасала сохранность растений: прибавка составляла 6,4...17,7 %. Одновременно фиксировалось увеличение листовой поверхности на 3,5...11,2 тыс. м²/га, а также увеличение выхода зелёной массы, которое достигало 9,5...17,5 %. Помимо этого, продуктивность агроценоза фестулолиума повышалась и по качественным показателям кормовой ценности. Отмечалось более высокое содержание кормовых единиц, переваримого протеина и обменной энергии.

Ключевые слова: фестулолиум, способ посева, норма высева, регуляторы роста, фотосинтез, сохранность, урожайность, кормовая ценность.

FORMATION OF HIGHLY PRODUCTIVE PHYTOCENOSES OF FESTULOLIUM IN THE FOOTHILL ZONE OF CENTRAL CISCAUCASIA

Abstract. To develop and refine cultivation practices for festulolium aimed at forming highly productive agrophytocenoses, field experiments were conducted in the forest-steppe zone of the Republic of North Ossetia–Alania in 2024–2025. The experimental site is located at an altitude of 520 m above sea level (Agroclimatic Region III) and is characterized by insufficient moisture availability. The soil is leached Pre-Caucasian chernozem, heavy loam, underlain by gravel deposits. The study focused on the festulolium cultivar «Vik-90»; the investigated factors included sowing methods, seeding rates, and the effects of growth-regulating agents of different origins: the biological product Baikal EM-1, the liquid complex organomineral fertilizer Potassium Humate, the natural agro-ore «Alanite», and para-aminobenzoic acid (PABA). Festulolium was shown to be of considerable interest for forage production in the Central Pre-Caucasus. Comparison of sowing methods and seeding rates made it possible to identify rational parameters for festulolium cultivation for forage purposes under forest-steppe conditions of RSO–Alania. The most substantiated option was wide-row sowing with 45 cm row spacing at a seeding rate of 4 million plants ha⁻¹. Presowing seed treatment with growth regulators of different origin improved a number of agronomically valuable traits. By harvest time, plant survival increased by 6.4–17.7 %. Leaf area simultaneously increased by 3.5–11.2 thousand m²/ha⁻¹, and green biomass yield rose by 9.5–17.5 %. In addition, festulolium agroecosis productivity improved in terms of forage quality, with higher contents of feed units, digestible protein, and metabolizable energy.

Keywords: festulolium, method of sowing, seeding rate, growth regulators, photosynthesis, preservation, yield, feed value

Введение. Полноценное снабжение сельскохозяйственных животных высококачественными кормами является определяющим условием роста их продуктивности. Основной объем кормовой продукции поступает с полевых кормовых угодий, которые играют ведущую роль в структуре кормовой базы. Существенным резервом повышения эффективности кормопроизводства в регионе Северного Кавказа выступают посевы многолетних и однолетних трав [1, 2]. Именно они формируют основу кормового рациона и выполняют ключевую функцию в системе зелёного конвейера, обеспечивая непрерывное поступление зелёной массы. Перспективы укрепления кормовой базы напрямую зависят от интенсификации производства полевых кормовых культур и повышения их продуктивности [3, 4].

В условиях современного земледелия наряду с традиционно возделываемыми культурами возрастает роль внедрения новых и нетрадиционных видов однолетних и многолетних трав [5, 6]. Эти растения отличаются более стабильной урожайностью, повышенной адаптивностью и, как правило, превосходят распространённые виды по энергетической и белковой ценности. Указанные свойства делают их особенно привлекательными для использования в системе современного кормопроизводства [7, 8].

Создание агроценозов, обладающих высоким энергетическим потенциалом, внедрение технологий, ориентированных на ресурсосбережение и экологическую безопасность, а также целенаправленное улучшение природных кормовых угодий рассматриваются как важнейшие факторы преодоления дефицита кормов и кормового белка в условиях Северного Кавказа [9, 10].

В современных условиях особое внимание уделяется применению регуляторов роста, которые выступают эффективным инструментом целенаправленного воздействия на растительный организм и позволяют более полно реализовать его биологический потенциал [11, 12].

Следует подчеркнуть, что многие технологические элементы возделывания достаточно глубоко изучены применительно к отдельным почвенно-климатическим зонам и специфическим экосистемам [13, 14]. В то же время, для ряда кормовых растений, которые рассматриваются как перспективные для внедрения (включая как традиционно возделываемые, так и сравнительно редкие виды), в настоящее время по-прежнему отсутствует комплексная характеристика применительно к условиям Центрального Предкавказья. Вследствие этого остаются недостаточно проработанными не только теоретические представления о построении высокопродуктивных агрофитоценозов, но и конкретные технологические приёмы, позволяющие целенаправленно управлять их продуктивностью.

Цель исследований – разработка и совершенствование технологических приёмов возделывания новой и мало распространённой многолетней кормовой культуры – фестулолиума для формирования высокопродуктивных агрофитоценозов.

Материалы и методы исследований. Полевые исследования выполнялись в лесостепной части РСО-Алания. Залужка опытов проводилась в 2024–2025 гг. на опытном участке учебно-научно-производственного отдела Горского государственного аграрного университета, расположенного на высоте около 520 м над уровнем моря и относящегося к III агроклиматическому району. Территория характеризуется недостаточным увлажнением: коэффициент увлажнения варьирует в интервале 0,20...0,26. Среднегодовая сумма осадков составляет 420...650 мм, а суммы температур выше 10 °С достигают 3000...3200 °С. Зимний период в целом умеренно мягкий; сумма отрицательных температур изменяется от –170 до –600 °С. Снежный покров, как правило, невысокий и держится на уровне 5...8 см. Начало вегетации растений обычно приходится на конец марта или начало апреля. Летний период описывается как умеренно жаркий: средняя температура июля находится в пределах 21...24 °С, тогда как абсолютные максимумы могут достигать 40...42 °С. В годы выполнения работы погодные условия в целом соответствовали типичным для данной природной зоны значениям.

В УНПО Горского ГАУ почвы представлены чернозёмами выщелоченными предкавказскими, тяжело- и среднесуглинистыми, подстилаемыми галечником. Мощность гумусового профиля (А + В) колеблется от 20 до 120 см. Содержание гумуса в пахотном горизонте достигает 5,9 % и относится к среднегумусным. Почвы отличаются высоким потенциальным плодородием. Ёмкость поглощения этих почв высокая (38...50 мг/экв на 100 г почвы). Степень насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями высокая (99...100 %). Реакция почвенной среды слабокислая (рН 6,5). В пахотном горизонте содержится валовых форм азота 0,38...0,48 %, фосфора – 0,20 % и калия – 1,70 %. Почва опытного участка в целом по содержанию валовых и доступных запасов питательных элементов относится к среднеобеспеченным.

Для решения поставленных задач была использована схема двух самостоятельных полевых опытов. В первом опыте применялась двухфакторная постановка, где оценивали сочетание способов посева и норм высева. По фактору А сравнивали рядовой посев с междурядьями 15 см и два варианта ширококрядного размещения растений (30 и 45 см). По фактору В изучали нормы высева 2, 3 и 4 млн семян на гектар. Второй опыт был однофакторным и был направлен на анализ действия регуляторов роста. В качестве изучаемых вариантов использовали биологический препарат Байкал ЭМ 1, жидкое комплексное органоминеральное удобрение (гумат калия), природную агоруду аланит, а также парааминобензойную кислоту (ПАБК).

Объектом исследования служил сорт фестулолиума «Вик-90» (оригинатор – ФНЦ ВИК им. В. Р. Вильямса). Все технологические приёмы выполнялись по региональным рекомендациям. Предшественником в севообороте являлся клевер луговой. Площадь одной делянки составляла 36 м², при этом учётная часть – 21 м². Опыты закладывали в трёх повторениях, варианты размещали случайным образом (рэндоимизация).

В ходе полевых работ проводили фенологические наблюдения, выполняли биометрические измерения, учитывали густоту стояния, оценивали показатели фотосинтетической деятельности и формирование продуктивности. Урожайность определяли по методике пробных площадок с последующим пересчётом к стандартной влажности.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием корреляционного и дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову. Для расчётов применяли программные средства пакета Microsoft Office.

Результаты и их обсуждение. Для повышения эффективности кормопроизводства целесообразно использовать не только традиционные, но и перспективные многолетние злаковые травы, отличающиеся высокой и стабильной урожайностью, а также улучшенными показателями энергетической и протеиновой ценности. Фестулолиум, гибрид овсяницы и райграса, представляет значительный интерес для кормопроизводства и семеноводства. Его биологические особенности требуют разработки специализированной технологии возделывания, отличающейся от технологий выращивания родительских форм.

Полученные данные свидетельствуют, что появление всходов фестулолиума происходило, как правило, на 13...14-е сутки после посева и не имело заметных различий между исследуемыми вариантами. Вместе с тем плотность всходов существенно определялась как нормой высева, так и шириной междурядий. Минимальное значение густоты (370 растений на 1 м²) зафиксировано при сочетании междурядий 45 см и нормы высева 4 млн шт./га. При уменьшении междурядий до 30 см плотность возрастала до 392 растений на 1 м². Наиболее высокая густота отмечалась при рядовом способе посева с междурядьями 15 см. К фазе кущения наблюдалось снижение густоты в результате конкуренции между растениями и естественного выпадения части особей. Однако общая тенденция сохранялась: при повышении нормы высева количество растений на единице площади в целом увеличивалось.

Известно, что величина валовой продукции во многом обусловлена уровнем фотосинтетической активности посевов. В наших наблюдениях в начальные периоды вегетации листовая поверхность фестулолиума формировалась относительно медленно, тогда как по мере приближения к цветению темпы её нарастания заметно возрастали (рис. 1).

Наиболее выраженное развитие ассимиляционного аппарата фиксировалось на ширококрядных посевах при минимальной норме высева. Вместе с тем максимальные значения площади ассимиляционной поверхности были получены при норме 4 млн шт./га, что, по-видимому, связано с формированием более благоприятной (с точки зрения продуктивности) плотности травостоя.

Следует учитывать, что избыточное нарастание листовой массы не всегда является положительным признаком: при чрезмерной облиственности ухудшается проникновение света вглубь травостоя, что в итоге может ограничивать интенсивность фотосинтеза и отрицательно сказываться на формировании урожая.

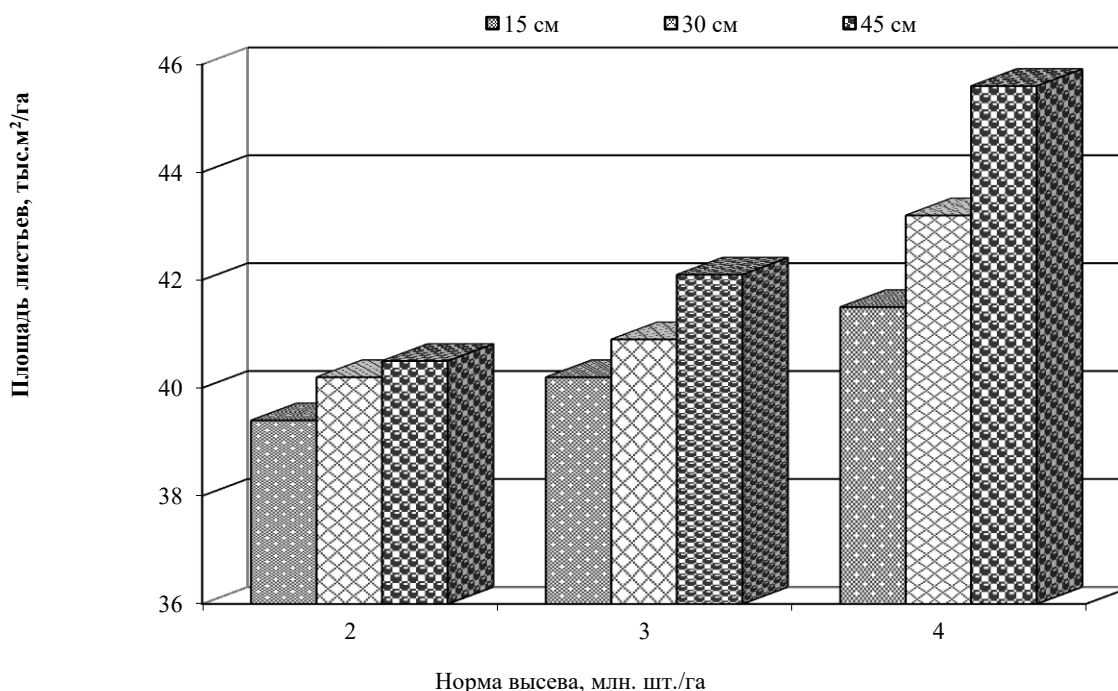


Рис. 1 – Площадь листьев растений фестулолиума в зависимости от норм и способов посева

Для характеристики результативности работы листового аппарата применяют интегральный показатель фотосинтетического потенциала (ФП). Установлено, что формирование фотосинтетического аппарата фестулолиума заметно варьировало в зависимости как от нормы высева, так и от технологии посева. Максимальные значения ФП за весь период вегетации (в интервале 1,47...1,72 млн м²×дн/га) отмечены в вариантах с наиболее высокой нормой высева (см. табл. 1).

Таблица 1 – Показатели фотосинтетической деятельности фестулолиума в зависимости от способов и норм высева

Показатели	Способ посева								
	Рядовой 15 см			Широкорядный 30 см			Широкорядный 45 см		
	Норма высева, млн. шт./га								
	2	3	4	2	3	4	2	3	4
ФП, млн. м²×дн./га	1,29	1,38	1,47	1,32	1,41	1,59	1,21	1,53	1,72
ЧПФ, г/м²×сутки	1,75	2,23	2,40	1,93	2,38	2,52	1,59	2,46	2,65
КПД ФАР, %	1,2	1,3	1,4	1,2	1,3	1,4	1,2	1,4	1,5

Параметр, отражающий эффективность образования сухого вещества на единицу листовой поверхности, то есть чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ), также зависел от приемов возделывания. Наибольшая ЧПФ (2,65 г/м²×сут) зарегистрирована при широкорядном размещении растений и норме высева 4 млн растений/га. Этот показатель служит объективной оценкой эффективности фотосинтетического аппарата.

Эффективность использования фотосинтетически активной радиации (КПД ФАР) определяет продуктивность растений за вегетационный период. Максимальное поглощение и утилизация солнечной радиации является критическим фактором увеличения продуктивности сельскохозяйственных культур. Агротехнические методы, такие как регулирование плотности посевов и их освещенности, позволяют оптимизировать интенсивность поглощения ФАР.

Анализ использования фотосинтетически активной радиации показал, что при норме высева 4 млн растений/га посе-вы характеризовались наиболее высоким КПД ФАР (1,4...1,5 %), причем этот эффект сохранялся независимо от выбранного способа посева. В целом повышение нормы высева сопровождалось ростом продуктивности растений (табл. 2).

Таблица 2 – Продуктивность агрофитоценоза фестулолиума в зависимости от способов и норм высева

Показатели	Способ посева (фактор А)								
	Рядовой 15 см			Широкорядный 30 см			Широкорядный 45 см		
	Норма высева (фактор В), млн. шт./га								
	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Урожайность зеленой массы, т/га	11,6	11,7	11,7	12,1	12,2	12,2	11,4	12,4	13,6
	HCP ₀₅ A = 0,40			HCP ₀₅ B = 0,42			HCP ₀₅ AB = 0,54		
Сбор сухого вещества с урожаем, т/га	2,69	3,00	3,29	2,88	2,88	2,99	2,76	2,75	2,82

На уровне урожайности зеленой массы преимущество также проявлялось в пользу широкорядного способа. При норме 4 млн растений/га получено 12,2 т/га при междурядьях 30 см и 13,6 т/га при 45 см, что превышало показатель рядового посева (11,7 т/га). Аналогично, накопление сухого вещества было выше при широкорядном посеве (2,75...2,82 т/га) по сравнению с рядовым (2,69...3,29 т/га).

Исследование продуктивности фестулолиума в условиях лесостепной зоны Республики Северная Осетия-Алания показало, что оптимальными агротехническими параметрами для кормового использования в первый год являются широко-рядный посев с нормой высева 4 млн. растений/га и междурядьями 45 см.

Одновременно следует отметить, что в современных системах земледелия все более активно применяются нетрадиционные подходы к обеспечению питания и стимуляции роста культур, ориентированные на повышение как урожайности, так и кормовой ценности продукции. Использование регуляторов роста растений актуально для оптимизации развития культур и повышения продуктивности. Предпосевная обработка семян этими препаратами стимулирует ранние стадии роста и ускоряет переход к фотосинтезу.

В проведенных опытах выявлена однозначная связь между выживаемостью растений и предпосевной обработкой семян регуляторами роста: использование отдельных препаратов и их сочетаний увеличивало сохранность растений на 6,4...17,7 % по сравнению с контролем. Наилучший результат (94,5%, +17,7 % к контролю) был достигнут при применении препаратов «Байкал ЭМ-1» и гумата калия. Важно отметить, что использование регуляторов роста по отдельности оказалось менее эффективным, чем их комбинированное применение. Так, обработка семян фестулолиума каждым из этих препаратов в отдельности повысила сохранность растений лишь на 7,8...9,3 % (табл. 3).

Исследование фотосинтетической активности посевов фестулолиума показало, что обработка семян регуляторами роста существенно влияет на динамику развития листовой поверхности. В контрольной группе (без обработки) максимальная ассимиляционная поверхность листьев составила 24,4 тыс. м²/га. Применение регуляторов роста по отдельности увеличило этот показатель на 3,5...5,7 тыс. м²/га по сравнению с контролем. Наиболее выраженное нарастание листовой поверхности наблюдалось при совместном применении регуляторов роста с препаратом «Байкал ЭМ 1»: прибавка относительно контроля составила 10,1...11,2 тыс. м²/га. Максимальная площадь листьев (35,6 тыс. м²/га) зафиксирована при сочетании «Байкал ЭМ 1» и гумата калия. При этом же варианте фотосинтетический потенциал оказался выше контрольного на 20,4 %, тогда как остальные комбинации также превосходили контроль по данному показателю, хотя и в меньшей степени.

Таблица 3 – Влияние регуляторов роста на показатели сохранности и фотосинтетической деятельности растений фестулолиума

Показатели	Варианты опыта					
	Контроль	Гумат калия	ПАБК	Байкал ЭМ 1	Байкал ЭМ 1 + гумат калия	Байкал ЭМ 1 + ПАБК
Сохранность растений к уборке, %	77,1	86,4	83,5	84,9	94,8	91,3
ПЛ, тыс.м ² /га	24,4	28,1	30,2	27,9	35,6	34,5
ФП, млн.м ² /га	1,13	1,29	1,32	1,27	1,36	1,35
ЧПФ, г·м ² /сут.	1,68	1,87	1,92	1,85	2,34	2,17

Разные стимуляторы неодинаково воздействовали на фотосинтетическую активность и длительность продуктивного функционирования травостоя. Наиболее высокая ЧПФ отмечена при обработке семян совместно «Байкал ЭМ 1» и гуматом калия: прирост составил 39,2 % относительно контроля. Применение препаратов по отдельности также улучшало показатель (на 10,1...14,3 %), однако уступало эффективности их комбинированного использования.

По урожайности зеленой массы аналогичная закономерность сохранялась: при раздельной обработке регуляторами получена прибавка 9,5...11,7 % к контролю, тогда как комбинированные варианты обеспечивали более значительный прирост – 15,3...17,5 % (табл. 4).

Таблица 4 – Влияние регуляторов роста на продуктивность агроценоза фестулолиума

Показатели	Варианты опыта					
	Контроль	Гумат калия	ПАБК	Байкал ЭМ 1	Байкал ЭМ1 + гумат калия	Байкал ЭМ 1 + ПАБК
Урожайность зеленой массы, т/га	13,7	15,2	15,3	15,0	16,1	15,8
Сбор сухого вещества, т/га	4,21	4,62	4,51	4,42	4,79	4,73
Сбор кормовых единиц, тыс./га	2,07	2,21	2,20	2,16	2,34	2,27
Сбор переваримого протеина, кг/га	395	471	434	423	501	480
Получено обменной энергии, ГДж/га	49,12	51,56	51,23	50,82	52,37	51,93

Максимальное содержание сухого вещества было достигнуто при обработке семян гуматом калия. Его использование в чистом виде увеличило сбор сухого вещества на 0,41 т/га (9,7 %) по сравнению с контролем. Совместное применение гумата калия с «Байкал ЭМ 1» дало наилучший результат – 4,79 т/га, что на 13,8 % выше контрольного значения.

Использование регуляторов роста растений благоприятно повлияло на кормовую ценность урожая. Изменения коснулись и качественных характеристик корма. После обработки семян увеличивалось содержание кормовых единиц: на 4,3...6,8 % при использовании стимуляторов по отдельности и на 9,7...13,0 % при их сочетаниях.

Содержание переваримого протеина также возрастало: при применении биопрепаратов прибавка составляла 7,1...19,2 %, а максимальные значения (21,5...26,8 %) получены в вариантах, где использовались комбинации препаратов с «Байкал ЭМ-1».

Кроме того, применение регуляторов роста приводило к росту обменной энергии; при одиночной обработке увеличение составляло 1,70...2,44 ГДж/га по сравнению с контролем. Совместное использование регуляторов роста обеспечило еще более значительное увеличение обменной энергии – на 2,81...3,25 ГДж/га.

Заключение. Сопоставление результатов по способам посева и нормам высева позволило определить рациональные параметры возделывания фестулолиума для кормового направления в лесостепных условиях Республики Северная Осетия-Алания. Наиболее обоснованным вариантом признан широкоярусный посев с междурядьями 45 см при норме высева 4 млн растений/га.

Предпосевная обработка семян фестулолиума рострегулирующими препаратами различного происхождения способствует улучшению ряда хозяйственно ценных характеристик культуры. В ходе наблюдений установлено, что к моменту уборки возрастает сохранность растений: прибавка составляла 6,4...17,7 %. Одновременно фиксировалось увеличение листовой поверхности на 3,5...11,2 тыс. м²/га, а также увеличение выхода зеленой массы, которое достигало 9,5...17,5 %. Помимо этого, продуктивность агроценоза фестулолиума повышалась и по качественным показателям кормовой ценности. Отмечалось более высокое содержание кормовых единиц, переваримого протеина и обменной энергии.

Библиография

1. Нелюбина Ж.С. Кормовая продуктивность и ботанический состав агрофитоценозов многолетних трав / Ж. С. Нелюбина, Н. И. Касаткина // Аграрный научный журнал. 2025. № 4. С. 28–34. Doi: 10.28983/asj.y2025i4pp28-34.
2. Ecological significance of winter camelina in biological agriculture / S. A. Bekuzarova, S. S. Basiev, A. Kh. Kozyrev [et al.] // Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. 2018. Vol. 10, № 4. P. 893–895. EDN UYADIA.
3. Бакшаев Д.Ю. Эффективность и конкурентная способность фестулолиума в смеси с люцерной при выращивании на корм / Д. Ю. Бакшаев // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53, № 1. С. 36–44. Doi: 10.26898/0370-8799-2023-1-5.
4. Образцов В.Н. Фотосинтетическая деятельность посевов фестулолиума в зависимости от сорта / В. Н. Образцов, С. В. Кадыров // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 4(79). С. 13–21. Doi: 10.53914/issn2071-2243_2023_4_13.
5. Костицын Р.Д. Создание и рациональное использование разноспелевающих травостоев в зоне неустойчивого увлажнения / Р. Д. Костицын, О. В. Хонина // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37, № 9. С. 24–30. Doi: 10.53859/02352451_2023_37_9_24.
6. Продуктивность сортов многолетних злаковых трав в условиях Ярославской области / А. А. Лобанова, Т. П. Сабирова, А. В. Тихонов, А. А. Трущенко // Кормопроизводство. 2024. № 10. С. 29–34. Doi: 10.30906/1562-0417-2024-10-29-34.
7. Коновалова Н.Ю. Перспективные бобово-злаковые травосмеси для агроклиматических условий Европейского Севера России / Н. Ю. Коновалова, С. С. Коновалова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2024. № 2(71). С. 63–73. Doi: 10.31677/2072-6724-2024-71-2-63-73.
8. Тютюма Н. В. Травосмеси для создания высококачественных интенсивных сенокосов в полупустынной зоне России / Н. В. Тютюма, Г. С. Егорова, Н. И. Кудряшова // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19, № 2(74). С. 32–38. Doi: 10.12737/2073-0462-2024-32-38.
9. Козырева, М.Ю. Агротехническая роль люцерны в предгорной зоне РСО-Алания / М. Ю. Козырева, Л. Ж. Басиева // Проблемы развития АПК региона. 2020. № 2(42). С. 110–115. Doi: 10.15217/issn2079-0996.2020.2.110.
10. Degradation and restoration of mountain pastures / S. Bekuzarova, S. Kozyrev, A. Kozyrev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Moscow, 2020. P. 012046. Doi: 10.1088/1755-1315/579/1/012046.
11. Урожайность люцерны серповидной в одновидовых посевах и травосмесях с фестулолиумом при применении регуляторов роста / С. А. Дикарева, А. А. Климов, Е. М. Куренкова, Н. Н. Лазарев // Плодородие. 2024. № 6(141). С. 72–76. Doi: 10.25680/S19948603.2024.141.16.
12. Doev D.N. Biological nitrogen share in lucerne plants nutrition depending on the activeness of nodule bacteria strain / D. N. Doev, V. P. Tsotsieva, L. Zh. Basieva // Science Almanac of Black Sea Region Countries. 2015. № 4(4). P. 34–37. EDN VPSGNV.
13. Бакшаев Д.Ю. Подбор бобового компонента при посеве в смеси с фестулолиумом на кормовые цели в лесостепи Западной Сибири / Д. Ю. Бакшаев, Н. И. Кашеваров, И. Л. Жданова // Кормопроизводство. 2025. № 4. С. 34–39. Doi: 10.30906/1562-0417-2025-4-34-39.
14. Эседуллаев С.Т. Многолетние травы и их смеси - важнейший фактор повышения плодородия почв и продуктивности пашни в Верхневолжье / С. Т. Эседуллаев // Плодородие. 2022. № 6(129). С. 59–63. Doi: 10.25680/S19948603.2022.129.16.

References

1. Nelyubina Zh.S., Kasatkina N.I. Forage productivity and botanical composition of agrophytocenoses of perennial grasses // The Agricultural Scientific Journal. 2025; 4: 28–34. (In Russ.).
2. S.A. Bekuzarova, S.S. Basiev, A.Kh. Kozyrev et al. Ecological significance of winter camelina in biological agriculture // Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. 2018; 10(4): 893–895.
3. Bakshaev D.Yu. Efficiency and competitive ability of festulolium mixed with alfalfa when grown for feed // Siberian Herald of Agricultural Science. 2023; 53(1): 36–44. (In Russ.).
4. Obratsov V.N., Kadyrov S.V. Photosynthetic activity of festulolium crops depending on variety // Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2023; 16(4(79)): 13–21. (In Russ.).
5. Kostitsyn R.D., Khonina O.V. Creation and rational use of grass stands of different ripeness in the zone of unstable moisture // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023; 37(9): 24–30. (In Russ.).
6. Lobanova A.A., Sabirova T.P., Tikhonov A.V., Trushchenko A.A. Productivity of varieties of perennial grasses under the conditions of the yaroslavl oblast' // Kormoproizvodstvo. 2024; 10: 29–34. (In Russ.).
7. Konovalova N.Yu., Konovalova S.S. Promising legume-cereal grass mixtures for agroclimatic conditions of the European North of Russia // Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2024; 2(71): 63–73. (In Russ.).
8. Tyutyuma N., Egorova G., Kudryashova N. Grass mixtures for the creation of high-quality intensive haymaking in the semi-desert zone of Russia // Vestnik of Kazan state agrarian university. 2024; 19(2(74)): 32–38. (In Russ.).

9. Kozyreva M.Yu., Basieva L.Zh. Agrotechnical role of lucerne in the foothill area of the Republic of North Ossetia-Alania // Problemy razvitiya APK regiona [Problems of development of the regional agro-industrial complex]. 2020; 2(42): 110–115. (In Russ.).
10. Bekuzarova S., Kozyrev S., Kozyrev A. et al. Degradation and restoration of mountain pastures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 012046.
11. Dikareva S.A., Klimov A.A., Kurenkova E.M., Lazarev N.N. Yield of yellow-flowered alfalfa (*Medicago Falcata* L.) variety Nizhegorodskaya in single-species crops and mixtures with festulolium (*X Festulolium* F. Aschers. Et Graebn.) with the use of growth regulators // Plodorodie. 2024; 6(141): 72–76. (In Russ.).
12. Doev D.N., Tsotsieva V.P., Basieva L.Zh. Biological nitrogen share in lucerne plants nutrition depending on the activeness of nodule bacteria strain // Science Almanac of Black Sea Region Countries. 2015; 4(4): 34–37.
13. Bakshaev D.Y., Kashevarov N.I., Zhdanova I.L. Selection of the bean component when sowing in a mixture with *Festulolium Hercynicum* for forage purposes in the forest-steppe of Western Siberia // Kormoproizvodstvo. 2025; 4: 34–39. (In Russ.).
14. Esdullaev S.T. Permanent grasses and their mixtures - important factor of increasing the fertility of soddy-podzolic soils and the productivity arable land in the Upper Volga region // Plodorodie. 2022; 6(129): 59–63. (In Russ.).

Сведения об авторах

Мазлоев Эдуард Батразович, аспирант кафедры землеустройства и экологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», ул. Кирова, д. 37, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия, 362040; e-mail: mazloev993@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1079-960X>;

Калоев Борис Сергеевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоотехнии и аквакультуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», ул. Кирова, д. 37, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия, 362040; e-mail: bkaloev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6155-2448>;

Ханаева Дзерасса Каурбековна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры землеустройства и экологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», ул. Кирова, д. 37, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия, 362040; e-mail: dzerassa66@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2677-6341>;

Хугаева Людмила Мухарбековна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры землеустройства и экологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», ул. Кирова, д. 37, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия, 362040; e-mail: luda_689@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3345-9566>;

Козырев Асланбек Хасанович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Главный научный сотрудник отдела адаптивно-ландшафтного земледелия, Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук», ул. Вильямса, д. 1, с. Михайловское, Пригородный район, Республика Северная Осетия-Алания, Россия, 363110, e-mail: ironlag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2790-7895>.

Information about authors

Mazloev Eduard Batrazovich, postgraduate student of the Department of Land Management and Ecology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Gorsky State Agrarian University», 37 Kirova St., Vladikavkaz 362040, North Ossetia-Alania, e-mail: mazloev993@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1079-960X>;

Kaloev Boris Sergeevich, doctor of agricultural sciences, professor of the Department of Animal Science and Aquaculture, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Gorsky State Agrarian University», 37 Kirova St., Vladikavkaz 362040, North Ossetia-Alania, e-mail: bkaloev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6155-2448>;

Hanaeva Dzerassa Kaurbekovna, candidate of agricultural sciences, associate professor of the of the Department of Land Management and Ecology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Gorsky State Agrarian University», 37 Kirova St., Vladikavkaz 362040, North Ossetia-Alania, e-mail: dzerassa66@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2677-6341>;

Hugaeva Ludmila Muharbekovna, candidate of agricultural sciences, associate professor of the of the Department of Land Management and Ecology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Gorsky State Agrarian University», 37 Kirova St., Vladikavkaz 362040, North Ossetia-Alania, e-mail: luda_689@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3345-9566>;

Kozyrev Aslanbek Khasanovich, doctor of agricultural sciences, professor, Chief Researcher of the Department of Adaptive Landscape Agriculture, North Caucasian Research Institute of Mountain and Piedmont Agriculture – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 1 Williams St., s. Mikhailovskoye, Prigorodny district, 363110, North Ossetia-Alania, e-mail: ironlag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2790-7895>.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА РОБОТА ДЛЯ СБОРА ЧАЯ

Аннотация. В данной статье рассматривается задача трехмерного планирования траектории роботизированного сбора чайных побегов в неструктурированных чайных садах, характеризующихся случайным и неравномерным пространственным распределением собираемых побегов. Чтобы преодолеть ограничения, присущие традиционным методам, использующим один алгоритм оптимизации, а именно медленную сходимость и подверженность локальным оптимумам при оптимизации с помощью муравьиных алгоритмов (АСО), а также низкую точность локального поиска в генетических алгоритмах (ГА), в этом исследовании предлагается новая гибридная система оптимизации АСО-GA-2-opt. Вначале задача математически формулируется как задача коммивояжера (TSP), где целевая функция оптимизации заключается в минимизации общего расстояния перемещения манипулятора робота. В предлагаемой структуре синергетически работают три алгоритма: АСО используется для быстрой генерации набора исходных возможных траекторий; ГА используется для проведения исследования этого набора траекторий, используя свои эволюционные операторы, чтобы избежать локальных оптимумов; эвристика с двумя вариантами выбора применяется для интенсивного локального уточнения, устранения пересечений путей и избыточных обходов для достижения локальной сходимости. Эта каскадная схема эффективно сочетает возможности глобального поиска с точностью локальной сходимости. Экспериментальная проверка была проведена с использованием 3D-координат данных 50 чайных побегов, в ходе которой предлагаемый алгоритм сравнивался с традиционными ГА, АСО и комбинацией АСО и 2-opt. Результаты показывают, что гибридный алгоритм АСО-GA-2-opt обеспечивает наименьшую среднюю длину пути и оптимальную наилучшую длину пути, сохраняя при этом высокую стабильность решения. Несмотря на умеренное увеличение времени вычислений, значительные улучшения в оптимальности траектории подтверждают эффективность предложенной стратегии комбинации нескольких алгоритмов. Эта работа представляет собой эффективное и практичное решение для автоматизированной уборки чая с помощью автономного робота, а система оптимизации дает ценную информацию для решения сложных задач планирования пути и для других видов сельскохозяйственных роботов.

Ключевые слова: планирование пути, АСО, ГА, АСО + 2-opt, АСО-GA-2-opt.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR PATH PLANNING OF ROBOT ARM FOR PLUCKING TEA

Abstract. This paper addresses the challenge of three-dimensional path planning for robotic tea shoot harvesting in unstructured tea garden environments, characterized by the random and non-uniform spatial distribution of target shoots. To overcome the inherent limitations of conventional single-algorithm methods—namely, the slow convergence and susceptibility to local optima of Ant Colony Optimization (ACO), and the poor local search precision of Genetic Algorithms (GA) – this study proposes a novel hybrid ACO-GA-2-opt optimization framework. The problem is first mathematically formulated as a constrained Traveling Salesman Problem (TSP) with the optimization objective of minimizing the total travel distance of the robotic manipulator. In the proposed framework, the three algorithms function synergistically: ACO is employed to rapidly generate a set of high-quality initial feasible paths; GA is then utilized to perform robust global exploration on these paths, leveraging its evolutionary operators to escape local optima; finally, the 2-opt heuristic is applied for intensive local refinement, eliminating path intersections and redundant traversals to achieve superior local convergence. This cascaded design effectively balances global search capability with local convergence accuracy. Experimental validation was conducted using 3D coordinate data from 50 tea shoots, comparing the proposed algorithm against GA, pure ACO, and an ACO+2-opt combination. The results demonstrate that the hybrid ACO-GA-2-opt algorithm achieves the shortest average path length and the optimal best path length, while maintaining high solution stability. Although computational time is moderately increased, the significant improvements in path optimality and convergence performance confirm the effectiveness of the proposed multi-algorithm fusion strategy. This work provides an efficient and practical solution for automated tea harvesting, and its optimization framework offers valuable insights for complex path planning problems in other agricultural robotics applications.

Keywords: path planning, ACO, GA, ACO + 2-opt, ACO-GA-2-opt.

1. Introduction

In China, high-quality tea is typically harvested by manual picking. Owing to its gentle operation, manual harvesting preserves the morphological integrity of tea shoots and prevents physical damage to tender buds [1]. However, manual tea picking is labor-intensive and time-consuming. With the accelerating process of urbanization and the increasing aging of the population (Fig. 1), labor shortages have become a severe constraint [2]. At present, commercially available tea harvesting machines are incapable of accurately identifying and localizing tender tea shoots [3]. These machines generally operate by uniformly cutting the upper canopy of tea bushes using blades. Such a “one-cut-fits-all” harvesting strategy inevitably leads to the mixing of young and old leaves [4], the inclusion of a large number of stems and broken leaves, and mechanical damage to tea branches, thereby affecting subsequent bud regeneration. Robotic harvesting is widely regarded as a promising solution to these challenges [5]. The key technologies involved in harvesting robots include tea-shoot recognition and localization, manipulator path planning, and the development of flexible end-effectors for gentle picking. While extensive research has been conducted on the recognition and localization of tea shoots [6-8], relatively limited attention has been paid to manipulator path planning [9] and end-effector design [10].

In unstructured tea garden environments, target tea shoots exhibit random, sparse, and non-uniform spatial distributions, and their morphological characteristics, such as orientation and posture (Fig. 2). These factors impose stringent requirements on robotic manipulators, including multi-degree-of-freedom adaptive posture adjustment and real-time trajectory replanning capabilities. Reasonable path planning for tea-shoot harvesting can not only improve picking efficiency but also effectively reduce unnecessary manipulator motion and energy consumption [11], while minimizing the risk of mechanical damage to tea plants. Therefore, the path planning problem for tea harvesting is one of the critical challenges that must be addressed in robotic tea-picking systems [12, 13].



Fig. 1 – Manual plucking-tea



Fig. 2 – Distribution of tea shoots

Traditional path-planning methods, such as the Dijkstra algorithm [14], the A* algorithm [15], and artificial potential field approaches [16], are commonly employed. Nevertheless, for harvesting robot applications, intelligent path-planning algorithms are more prevalent, among which the Genetic Algorithm (GA) [17] and Ant Colony Optimization (ACO) algorithms [18] are the most widely investigated. Nevertheless, traditional single-algorithm optimization frameworks exhibit inherent limitations when addressing complex and highly nonlinear path-planning problems. The classical ACO algorithm constructs solutions through a pheromone-based positive feedback mechanism, which endows it with robustness and distributed search capability. However, due to the uniform initialization of pheromone trails, ACO often suffers from slow convergence in the early stages of optimization. In addition, excessive pheromone accumulation in later iterations may lead to premature convergence and entrapment in local optima [19]. In contrast, the basic GA [20] achieves global exploration through population-based evolutionary operations, including selection, crossover, and mutation. Although GA demonstrates strong global search capability, its evolutionary operators lack effective local guidance. Consequently, the search process may exhibit random-walk behavior, resulting in insufficient solution accuracy, particularly during the later stages of optimization [21].

To overcome the above limitations, this paper proposes a hybrid optimization framework that integrates ACO, GA, and a local refinement strategy. Specifically, ACO is employed to generate high-quality initial solutions, thereby accelerating convergence and improving the initial population diversity of GA. Subsequently, GA is used to perform global optimization to avoid local optima. Finally, a 2-opt local search method is introduced to refine the solutions further and enhance local optimality. By effectively combining the complementary advantages of these algorithms, the proposed hybrid framework significantly improves the convergence speed, solution quality, and overall performance of the path planning process.

2. Modeling the Path Planning Problem for Plucking-tea

In the tea bud plucking scenario, it is assumed that a machine vision system has accurately detected and localized N target tea buds to be harvested. These targets are represented as a set of three-dimensional spatial coordinates ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$) expressed in the robot base coordinate frame. The primary objective of path planning in this study is to determine an optimal motion path for the robotic manipulator that starts from a given initial position, visits each tea bud exactly once, and finally returns to the starting point or reaches a designated terminal point. The optimality of the planned path is evaluated by minimizing the total Euclidean travel distance or the estimated total execution time.

To achieve efficient operation of the robot plucking tea, the path planning problem must be transformed into a computable combinatorial optimization model. This study employs a topological graph approach to model the environment, abstracting the picking scenario as a weighted complete graph $G = (V, E)$. Here, the vertex set $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ represents the operational points of the robot, with v_0 being the starting point/origin of the robotic arm, and v_1 to v_n representing the spatial coordinates (x_i, y_i, z_i) of the n tea shoots identified by the machine vision system. Each edge $e(i, j)$ in the edge set E connects vertices v_i and v_j (where $i \neq j$) with the weight w_{ij} defined as the Euclidean distance between the two vertices:

$$d(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2.1)$$

This weight quantifies the movement cost. The objective of the path planning is to find the shortest path that starts from the vertex v_0 , visits all tea bud vertices exactly once, and ultimately returns to v_0 (forming a closed loop). This problem is fundamentally a constrained version of the Traveling Salesman Problem (TSP) with a designated starting point. The objective function is to minimize the total path length L_{Min} :

$$L_{Min} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n d(i, j) \cdot x_{ij} \quad (2.2)$$

Where x_{ij} is a binary decision variable that takes a value of 1 if $e(i, j)$ is included in the path, and 0 otherwise, here, i denotes the "from" vertex and j denotes the "to" vertex, specifically indicating which tea shoot point the path should move to next from the current tea shoot point. The mathematical model for path planning must satisfy strict combinatorial optimization constraints to ensure the validity of the solution. First, the uniqueness of visits constraint and the path continuity constraint are defined. Equation (2.3) ensures that each tea shoot point j has exactly one incoming path flow, meaning that any tea bud point can only be visited once:

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.3)$$

Equation (2.4) guarantees that from each tea bud point i , there is exactly one outgoing path:

$$\sum_{j=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (2.4)$$

However, satisfying only the above constraints may still result in invalid solutions comprising multiple independent sub-cycles. To enforce the formation of a single closed path, this study introduces the Miller-Tucker-Zemlin (MTZ)[22] sub-cycle elimination constraints, as shown in Equation (2.5):

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1, \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \quad (2.5)$$

where u_i is an auxiliary variable representing the implicit order of vertex i in the path sequence. The logical core of this constraint is that when edge (i, j) is activated ($x_{ij} = 1$), it enforces $u_j > u_i$, thereby imposing a strictly increasing order relationship on the path. This mechanism mathematically eliminates any form of sub-cycle structure, which is crucial for accurately and completely modeling the Traveling Salesman Problem.

3. Hybrid ACO-GA-2-opt Algorithm

Based on the mathematical model for tea shoot plucking path planning developed in Section 2, the proposed algorithm (Fig. 3), as illustrated in the flowchart, implements a hybrid optimization strategy for path planning by integrating Ant Colony Optimization (ACO), a Genetic Algorithm (GA), and a 2-opt local search mechanism. The process is structured into two main sequential phases: an initial global exploration phase using ACO, followed by an evolutionary refinement phase using a GA enhanced with a 2-opt local optimizer.

The algorithm commences by loading the three-dimensional coordinate data of the target tea shoot points and initializing the parameters for the ACO. In the first phase, the ACO algorithm iteratively constructs paths. For each iteration, every ant in the colony builds a complete path by probabilistically selecting the next point to visit. This probability is calculated based on the pheromone concentration on the connecting edge and a heuristic function, typically the inverse of the Euclidean distance between points, favoring shorter, more promising edges. An ant continues this process until all points have been visited, at which point the path for that ant is complete. Once all ants have constructed their paths, the global pheromone trails are updated. This update involves both the evaporation of existing pheromones and the deposition of new pheromones on the edges belonging to the best path found so far, thereby guiding subsequent ants toward higher-quality solutions. The best path and its total distance from the current ACO run are recorded. This ACO process continues for a pre-defined number of iterations (n iterations?), with the current best solution's distance being printed at regular intervals (e.g., every 50 generations) for monitoring purposes. Upon completion, the ACO phase returns an optimal or near-optimal path, which serves as a high-quality initial solution for the subsequent GA phase.

The second phase employs a Genetic Algorithm to further optimize the path provided by the ACO. The algorithm enters an evolutionary loop where a population of candidate paths is processed. For each individual in the population, a fitness value is calculated, typically based on the total path distance (where shorter paths receive higher fitness). If the current individual represents a better solution than the current global best, the global best path and distance are updated. A key enhancement in this phase is the application of a 2-opt algorithm to refine the best-discovered path, which works by systematically removing crossings and local inefficiencies to produce a shorter route. To generate the next generation, an elitist strategy is employed to retain the best-performing individuals, ensuring that high-quality solutions are not lost. Tournament selection is then used to choose parents for reproduction. These parents undergo crossover and mutation operations to produce offspring, introducing new genetic material into the population. The new population is formed by retaining the top individuals (e.g., the first POPULATION_SIZE updated individuals) from the combined pool of parents and offspring. This evolutionary cycle repeats until a termination condition is met, at which point the final optimized path is output. The process concludes with the visualization of the results, plotting the nodes and the optimized path, and annotating key nodes for clear interpretation. This cascade of ACO for initial solution generation, followed by GA with 2-opt local refinement, ensures a robust and efficient search for the global optimum in the path planning task.

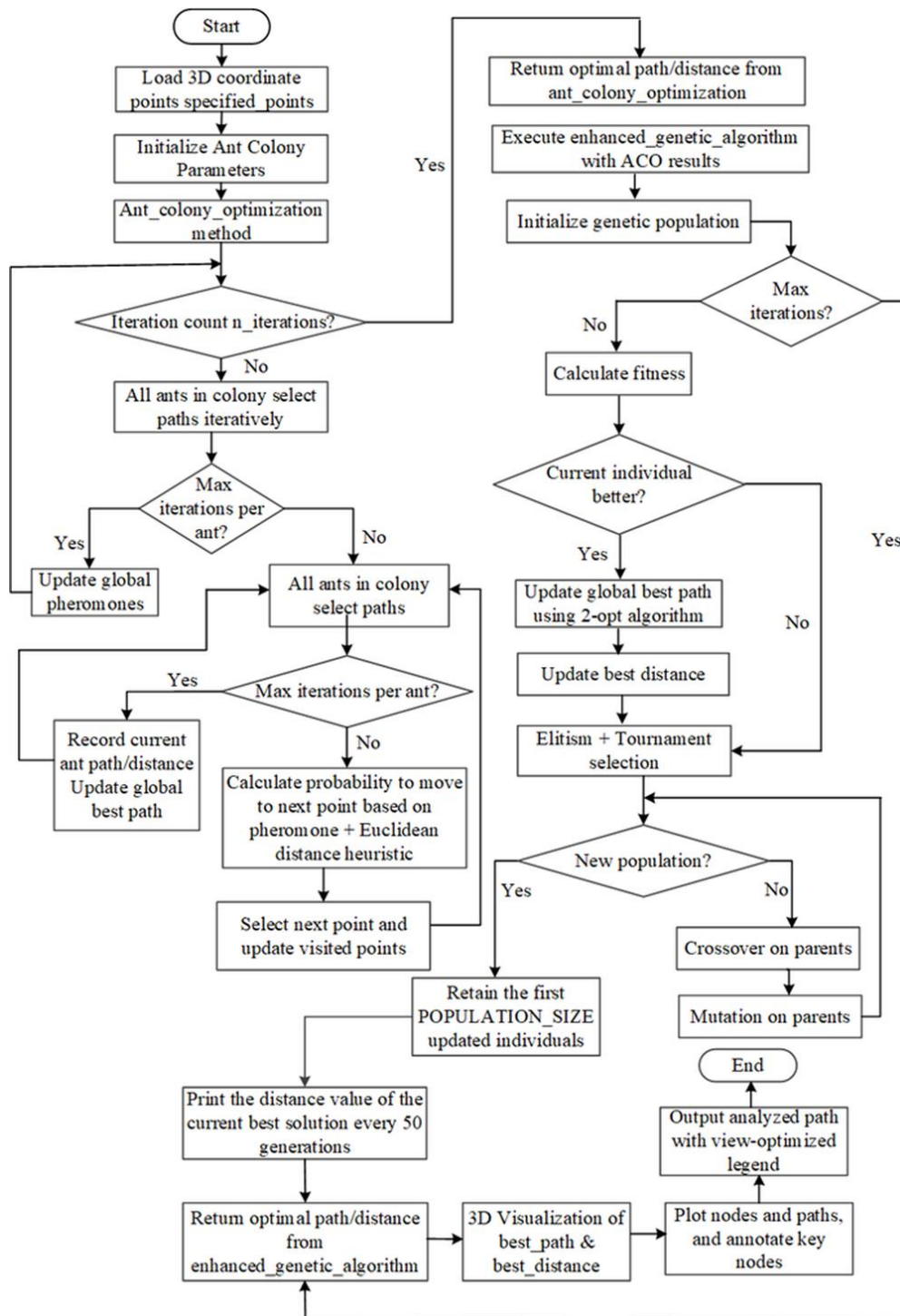


Fig. 3 – Flowchart of integration of ACO and GA

4. Experiment and Result Analysis

4.1. Experimental Environment

The experimental environment consists of a hardware setup featuring an Intel Core i7-12650H CPU, 32GB of RAM, and an NVIDIA RTX 3050 GPU. The software environment runs on a 64-bit Windows 11 operating system with Python version 3.9. It utilizes essential dependencies, including NumPy (1.23.5) and Matplotlib (3.7.4), which are employed for data computation and visualization.

4.2. Experimental Data

The data was collected using a machine vision system, and three-dimensional coordinate data for 50 tea shoots were obtained, as shown in Table 1.

Table 1 – Tea shoot coordinates (unit: mm)

No.	coordinates	No.	coordinates	No.	coordinates
P1	132.3, -31.2, 175.7	P18	-77.00, -19.9, -28.5	P35	222.7, -92.5, 212.6
P2	-7.4, 150.0, -7.3	P19	21.68, 167.7, 147.7	P36	-48.8, 86.6, 78.2
P3	204.2, 181.6, -70.7	P20	95.80, 139.7, -85.2	P37	219.9, 102.8, -37.0

Continuation of table 1

P4	18.7, 212.1, 94.3	P21	-42.40, 174.9, 33.40	P38	108.2, -25.9, 133.0
P5	194.6, 136.0, 0.95	P22	-58.80, -3.10, 228.0	P39	24.5, -83.3, -212.6
P6	62.8, -86.5, 59.20	P23	-6.40, -62.50, -45.20	P40	156.0, -59.4, -77.1
P7	-92.80, -67.50, -48.2	P24	117.50, -57.7, 17.4	P41	-84.5, 38.7, -62.3
P8	156.20, 54.40, 69.7	P25	-24.20, 110.8, 43.6	P42	-54.0, 21.9, -63.5
P9	54.35, 82.94, -3.5	P26	225.4, 127.80, 133.4	P43	-59.0, -70.0, -19.3
P10	-94.2, -83.0, 220.1	P27	110.2, 43.3, 225.4	P44	69.5, 218.8, -16.1
P11	-74.7, 52.6, 210.0	P28	-16.9, -53.4, 160.7	P45	-90.6, 193.2, 128.8
P12	211.8, 135.2, -95.40	P29	62.1, 92.5, 102.3	P46	-62.7, 163.1, 78.8
P13	63.68, 98.80, -39.70	P30	69.6, 202.4, 188.5	P47	27.7, 29.0, -72.0
P14	186.10, 120.30, 106	P31	204.0, 221.9, 186.4	P48	18.5, -288.2, -105.6
P15	-82.90, 143.80, -51.9	P32	149.0, 210.0, 116.5	P49	-9.2, 228.9, -59.8
P16	184.10, 98.40, 89.8	P33	134.6, 43.5, 214.1	P50	119.7, 71.6, -21.1
P17	-97.40, -53.40, -69.4	P34	222.7, -92.5, 212.6		

4.3. Comparison Algorithm Design

To ensure that parameter differences do not interfere with the experimental results, the specific experimental parameters for the algorithms are presented in Table 2. This systematic approach allows for a fair comparison among the algorithms, facilitating an accurate assessment of the proposed hybrid method's performance.

Table 2 – Core parameters of each algorithm

Algorithm Type	Key Parameters
ACO	50 ants, 500 iterations; $\alpha=1$ (pheromone importance), $\beta=5$ (heuristic importance); $\rho=0.1$ (evaporation coefficient); $\tau_0=0.1$ (initial pheromone, uniform distribution).
GA	Population size=200, 800 iterations; $P_o=0.9$ (crossover probability, using Order Crossover); $P_m=0.3$ (mutation probability, using two-point swap); no elitism.
ACO + 2-opt	Inherits ACO parameters (50 ants, 500 iterations, $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.1$, $\tau_0=0.1$); 2-opt optimization executed once per ACO generation.
ACO-GA-2-opt	ACO module: same as ACO; GA module: population=200, 800 iterations, $P_o=0.9$ (OX), $P_m=0.3$ (70 % 2-opt + 30 % two-point swap), elitism ratio=0.1 (top 10 % retained); 2-opt triggered post-global optimal update per GA generation and post-final GA iteration.

4.4. Experimental Results and Analysis

(1). Visual Evaluation of 3D Path Optimization Algorithms

To enhance the efficiency of automated tea harvesting, this study examines 3D path optimization algorithms for tea shoot plucking through an integrated analysis of visual path morphology and quantitative performance evaluation. Fig. 4.1 illustrates the spatial distribution of tea shoots within the X-Y-Z coordinate, serving as the geometric foundation for effective path planning, while Fig. 4.2 presents the unoptimized, redundant original harvesting path, characterized by disordered and intersecting segments that underscore the necessity for algorithmic optimization. In subfigures Fig. 4.3 (a)–(d), the optimized paths reveal distinct visual characteristics reflecting the underlying mechanisms of each algorithm: the GA-optimized path (a) displays tortuous segments, highlighting its strength in global exploration but indicating limitations in local refinement; the ACO-optimized path (b) showcases a more structured topology due to ACO's pheromone-mediated swarm intelligence; the ACO+2-opt optimized path (c) features streamlined segments, demonstrating how the 2-opt local search heuristic effectively eliminates redundant traversals and validates the "global exploration + local refinement" paradigm; and the hybrid ACO-GA framework with double-stage 2-opt (Hybrid ACO-GA-2-opt) (d) exhibits a path morphology that synergizes the strengths of the aforementioned algorithms, inheriting ACO's spatial adaptability, GA's evolutionary convergence, and the granular local optimization of the double-stage 2-opt to balance global coverage with local efficiency. Collectively, these visual and quantitative results establish a critical benchmark for algorithm selection and multi-algorithm fusion in intelligent tea harvesting, with the Hybrid ACO-GA-2-opt's path morphology and performance highlighting its potential in addressing the complex trade-offs between exploration and exploitation in 3D path planning for agricultural automation.

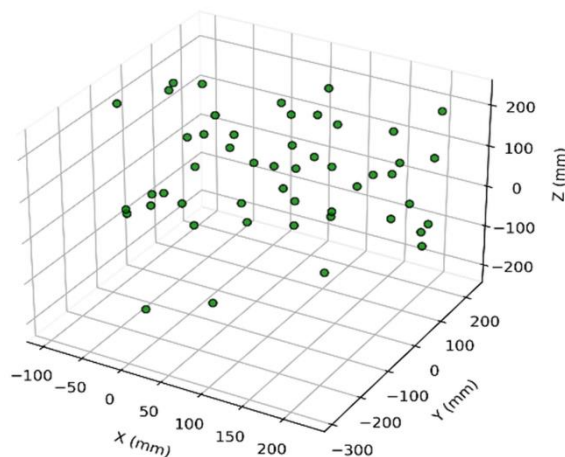


Fig. 4.1 – Distribution of tea shoots

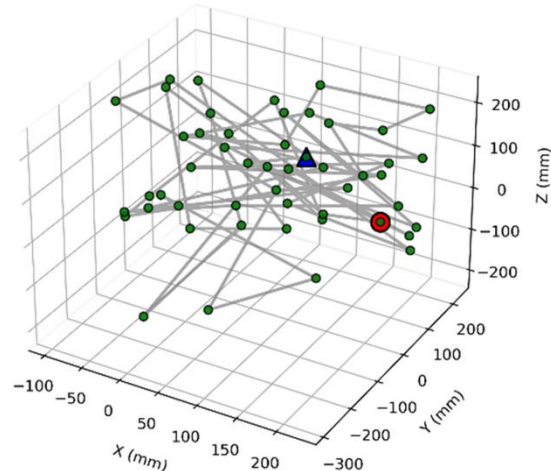


Fig. 4.2 – Original picking sequence

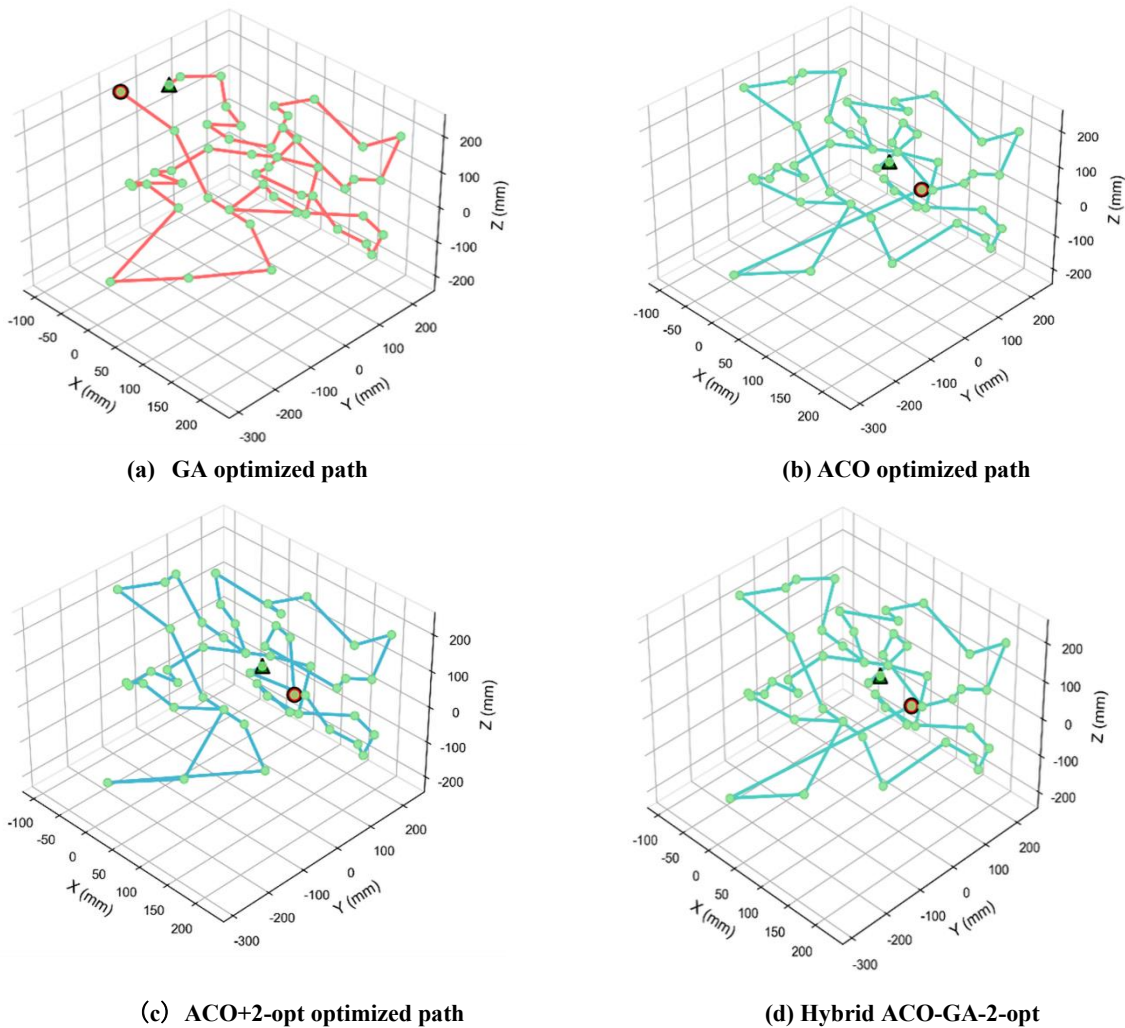


Fig. 4.3 – Path planning algorithm

(2) Performance Analysis of Path Optimization Algorithms

Table 3 presents the quantitative performance metrics of four path optimization algorithms – GA, ACO, ACO+2-opt, and the Hybrid ACO-GA-2-opt – specifically for 3D path planning in automated tea shoot harvesting. The metrics focus on three key aspects: path quality, which includes average, best, and worst path lengths; solution stability, measured by the standard deviation of the path lengths; and computational efficiency, indicated by the average runtime of each algorithm. This comprehensive evaluation allows for a comparative analysis of how each algorithm performs in terms of generating effective paths, maintaining consistent solutions, and optimizing computational resources, thereby providing valuable insights for selecting the most suitable algorithm for tea harvesting applications.

Table 3 – Performance comparison of four path optimization algorithms

Algorithm	Average Path(mm)	Best Path (mm)	Worst Path(mm)	Standard deviation(mm)	Average Runtime(s)
GA	4599.35	4475.01	4782.23	83.96	19.58
ACO	4555.83	4441.37	4605.40	48.50	22.29
ACO+2-opt	4523.66	4441.37	4584.09	45.68	22.63
ACO-GA-2-opt	4506.41	4419.68	4573.62	46.27	38.24

Regarding path quality aimed at minimizing travel distance, the Hybrid ACO-GA-2-opt algorithm demonstrates superior performance compared to its counterparts across several metrics. It achieves the shortest average path length of 4506.41 mm, which is 17.25 mm shorter than ACO+2-opt (4523.66 mm), 49.42 mm shorter than ACO (4555.83 mm), and 92.94 mm shorter than GA (4599.35 mm). In terms of best path length, the Hybrid ACO-GA-2-opt also excels with an optimal result of 4419.68 mm, outperforming GA's best value of 4475.01 mm by 55.33 mm and exceeding the lower bounds of ACO and ACO+2-opt (4441.37 mm) by 21.69 mm. For the worst-case path length, it remains advantageous at 4573.62 mm, which is shorter than ACO+2-opt (4584.09 mm) by 10.47 mm, ACO (4605.40 mm) by 31.78 mm, and GA (4782.23 mm) by 208.61 mm. These results confirm the hybrid algorithm's effectiveness in enhancing path efficiency through the synergistic integration of ACO's swarm intelligence and GA's evolutionary convergence. In terms of solution stability, which is crucial for reducing output fluctuation and ensuring consistent performance of automated harvesting equipment, GA shows the least stability with the largest standard deviation of 83.96 mm due to its reliance on random evolutionary operations. In contrast, ACO, ACO+2-opt, and Hybrid ACO-GA-2-opt exhibit high stability, with standard

deviations of 48.50 mm, 45.68 mm, and 46.27 mm, respectively. Notably, the Hybrid ACO-GA-2-opt maintains stability comparable to ACO+2-opt, differing by only 0.59 mm, while still achieving shorter path lengths. This balance reflects its ability to optimize precision and consistency, attributed to GA's role in refining ACO-generated solutions and reducing the risk of premature convergence to suboptimal paths. When examining computational efficiency, a clear trade-off between efficiency and path performance emerges across the algorithms. GA is the fastest at 19.58 seconds, but sacrifices path quality and stability. ACO (22.29 s) and ACO+2-opt (22.63 s) achieve better path metrics with only marginal increases in runtime (≤ 3.05 s compared to GA). The Hybrid ACO-GA-2-opt has a longer average runtime of 38.24 seconds, which is 15.61 seconds longer than ACO and 15.95 seconds longer than ACO+2-opt. However, this increase is justified by the "time-for-quality" trade-off in practical automated tea harvesting scenarios. Since path planning typically occurs as a pre-operational step, moderate increases in planning time are acceptable. Moreover, the shorter path lengths enabled by the Hybrid ACO-GA-2-opt lead to reduced energy consumption of harvesting equipment and improved batch harvesting efficiency, outweighing the incremental computational costs.

(3) Convergence Analysis of Path Optimization Algorithms

Fig.4.4 illustrates the path length convergence of GA, ACO, ACO combined with 2-opt, and Hybrid ACO-GA-2-opt across 500 iterations for automated tea shoot harvesting path planning. The GA (red curve) demonstrates rapid initial convergence to approximately 4730 mm but subsequently stagnates, highlighting its susceptibility to local optima, as evidenced by its high standard deviation. In contrast, ACO (blue curve) exhibits a gradual decrease in path length, indicative of its global search capabilities, albeit with a slower convergence rate. ACO combined with 2-opt (green curve) surpasses pure ACO, showcasing a steeper decline in path length and faster convergence, which can be attributed to the local refinement provided by the 2-opt method, effectively eliminating redundant paths. Notably, the Hybrid ACO-GA (orange curve) consistently maintains the lowest path length throughout the iterations, benefiting from GA's high-quality initial solutions, ACO's adaptive global exploration, and the granular local optimization facilitated by the double-stage 2-opt. This synergistic approach visually corroborates its superior convergence speed and optimization quality, as observed in Table 4.3. These findings validate that the hybrid algorithm achieves the optimal balance between convergence efficiency and path quality, underscoring the efficacy of multi-algorithm fusion for three-dimensional path planning in automated tea harvesting.

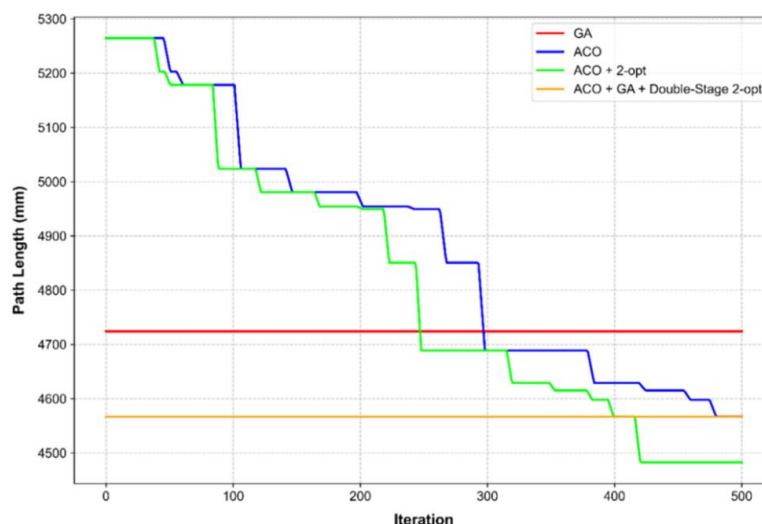


Fig. 4.4 – Convergence analysis

5. Conclusion

This study addresses the core challenge of three-dimensional path planning for automated tea shoot harvesting through a systematic framework that integrates problem modeling, algorithmic innovation, and experimental validation. First, a comprehensive path planning model for tea shoot harvesting is established, in which the spatial characteristics and operational constraints of tea garden environments are explicitly described. The optimization objective is mathematically formulated as the minimization of the total path length, providing a clear and rigorous theoretical basis for subsequent algorithm development. On this basis, a novel Hybrid ACO-GA-2-opt algorithm is proposed to overcome the inherent limitations of single-algorithm approaches. By exploiting the constructive solution generation capability of Ant Colony Optimization, the strong global search ability of Genetic Algorithms, and the efficiency of 2-opt local refinement, the proposed hybrid strategy achieves a balanced trade-off between global exploration and local exploitation. Experimental results demonstrate that the proposed method effectively improves solution quality and convergence performance in comparison with conventional algorithms. Overall, this study not only presents a practical and efficient solution for 3D path optimization in automated tea harvesting but also highlights the effectiveness of multi-algorithm fusion for solving complex optimization problems in agricultural automation. The proposed Hybrid ACO-GA-2-opt algorithm and its associated optimization framework provide valuable insights for the development of path planning methods in similar crop production and harvesting scenarios.

Библиография

1. Я. Ян, И. В. Чичерин, Л. Чжао и С. Лонг. Разработка и исследование сервомеханизма для сбора чая // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 1. С. 14–22. DOI 10.26730/1999-4125-2024-1-14-22. EDN NJCFPQ.
2. Ю.-Л. Лай, П.-Л. Чен и П.-Л. Йен. Совместное транспортное средство человек-робот для сбора чая // 7-я международная конференция по управлению, принятию решений и информационным технологиям (CoDIT), 2020, том II. 1: IEEE, стр. 217–222.

3. Т. Ипин, Х. Вангминг, Х. Ангуо и У. Вэйянг. Проектирование и эксперимент по созданию интеллектуальной машины для сбора чая с возможностью перевозки человека на основе машинного зрения // Труды Китайского общества сельскохозяйственной техники, 2016.
4. Ю. Хан, Х. Сяо, З. Сонг, У. Дин и С. Мэй. Проектирование и эксперименты с самоходной машиной для сбора чая 4CJ 1200 // Международный журнал сельскохозяйственной и биологической инженерии. 2021. Том 14, № 6. С. 75–84. doi: 10.25165/j.ijabe.20211406.5519.
5. Й. Ли и др. Разработка и полевая оценка роботизированной системы сбора урожая для сбора высококачественного чая // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. 2023. Т. 206. doi: 10.1016/j.compag.2023.107659.
6. Й. Ву и др. Усовершенствованная сеть YOLOv7 с использованием мультимодального слияния признаков RGB-D для обнаружения побегов чая // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. 2024. Т. 216. doi: 10.1016/j.compag.2023.108541.
7. Ю. Ву, Дж. Чен, Л. Хе, Дж. Гуи и Дж. Цзя. Модель обнаружения объектов в формате RGB-D с высокой способностью к обобщению, применяемая к роботу для сбора чая для обнаружения побегов разных сортов чая на открытом воздухе // Журнал полевой робототехники. 2024. Т. 41, № 4. С. 1167–1186. doi: 10.1002/rob.22318.
8. Л. Шуай и др. Усовершенствованный метод на основе YOLOv5 для обнаружения побегов чая разных видов и определения местоположения точки сбора в сложных условиях // Biosystems Engineering. 2023. Т. 231. С. 117–132. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2023.06.007.
9. Х. Янг и др. Робот для автоматического сбора чая высокого качества на основе компьютерного зрения с использованием параллельного манипулятора Delta // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. 2021. Т. 181. doi: 10.1016/j.compag.2020.105946.
10. Y. Zhu и др. Оценка производительности и эксперимент по допуску отклонений рабочего органа для сбора знаменитого чая // Сельское хозяйство. 2021. Т. 11. № 2. doi: 10.3390/agriculture11020128.
11. А. Утамима, М. Дж. Суластри, Л. Юниарти и А. Х. Ансарипур. Оптимизация планирования траектории движения нескольких машин для точного высева сельскохозяйственных культур с помощью алгоритма Lovebird // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. 2025. Т. 235. doi: 10.1016/j.compag.2025.110207.
12. Х. Тао, Р. Чжан, Л. Чжан, Д. Чжан, Т. Йи и М. Ву. Алгоритм формирования траектории навигации робота для сбора чая, основанный на семантической сегментации с использованием визуального датчика // Электроника. 2025. Т. 14, № 5. doi: 10.3390/electronics14050988.
13. Х. Ли, Дж. Янг, Х. Ванг, Л. Фу и С. Ли. Метод, основанный на адаптивном пошаговом RRT*, для планирования траектории роботизированной руки, собирающей чай // Sensors (Базель). 4 декабря 2024. Т. 24, № 23. doi: 10.3390/s24237759.
14. Ю. Лю, Дж. Ду и К. Чжан. Сравнение производительности алгоритма A* и алгоритма Дейкстры на основе оптимизации пути // Modern Electronics Technique. 2017. Т. 40, № 13. С. 181–183.
15. W. Wang, Q. Tao, Y. Cao, X. Wang и X. Zhang. Оптимальное по времени планирование траектории робота на основе улучшенного алгоритма поиска «cuckoo» // IEEE access. 2020. Т. 8. С. 86923–86933.
16. Г. Ли, У. Чоу. Планирование пути для мобильного робота с использованием самоадаптивного обучения методом роя частиц // Science China Information Sciences. 2018. Т. 61, № 5. С. 052204.
17. Ю. Чжэн, С. Ханг, Т. Тан, Г. Сяо и Х. Ванг. Исследование планирования пути сбора чая на основе улучшенного муравьиного алгоритма // Материалы 3-й Международной конференции по когнитивной обработке информации и ее приложениям. 2024. Т. 2 (Конспекты лекций по разработке данных и коммуникациям Технологии), Гл. 43. С. 497–509.
18. М. Ву, Б. Гао, Х. Ху, К. Хонг. Исследование планирования траектории робота-сборщика чая на основе муравьиного алгоритма // Измерение и контроль. 2024. Т. 57, № 8. С. 1051–1067. doi: 10.1177/00202940241228996.
19. Л. Чжан. Планирование пути сбора чайных листьев на основе улучшенного муравьиного алгоритма оптимизации // Международный журнал исследований знаний и инноваций. 2025. Т. 3, № 1. С. 12–25. doi: 10.56578/ijkis030102.
20. С. Чжан и др. Трехмерное непрерывное планирование траектории сбора на основе муравьиного алгоритма оптимизации // Plos one. 2023. Т. 18, № 2. С. e0282334.
21. А. Ламбора, К. Гупта, К. Чопра. Генетический алгоритм - обзор литературы // Международная конференция 2019 года по машинному обучению, большим данным, облачным и параллельным вычислениям (COMITCon), 2019: IEEE, с. 380–384.
22. Т. Бекташ, Л. Гувейя. Реквием по ограничениям устранения подциклов Миллера–Таккера–Землина? // Европейский журнал операционных исследований. 2014. Т. 236, № 3. С. 820–832.

References

1. Y. Yang, I. V. Chicherin, L. Zhao, and C. Long, Design and Research on Servomechanism of Tea Plucking, Vestnik of Kuzbass State Technical University, no. 1, pp. 14–22, 2024, DOI 10.26730/1999-4125-2024-1-14-22. EDN NJCFPQ.
2. Y.-L. Lai, P.-L. Chen, and P.-L. Yen, "A human-robot cooperative vehicle for tea plucking", in 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2020, vol. 1: IEEE, pp. 217–222.
3. T. Yiping, H. Wangming, H. Anguo, and W. Weiyang, "Design and Experiment of Intelligentized Tea-plucking Machine for Human Riding Based on Machine Vision", Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016.
4. Y. Han, H. Xiao, Z. Song, W. Ding, and S. Mei, "Design and experiments of 4CJ-1200 self-propelled tea plucking machine", International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 14, no. 6, pp. 75–84, 2021, doi: 10.25165/j.ijabe.20211406.5519.
5. Y. Li et al., "Development and field evaluation of a robotic harvesting system for plucking high-quality tea", Computers and Electronics in Agriculture, vol. 206, 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.107659.
6. Y. Wu et al., "An improved YOLOv7 network using RGB-D multi-modal feature fusion for tea shoots detection", Computers and Electronics in Agriculture, vol. 216, 2024, doi: 10.1016/j.compag.2023.108541.
7. Y. Wu, J. Chen, L. He, J. Gui, and J. Jia, "An RGB-D object detection model with high-generalization ability applied to tea harvesting robot for outdoor cross-variety tea shoots detection", Journal of Field Robotics, vol. 41, no. 4, pp. 1167–1186, 2024, doi: 10.1002/rob.22318.
8. L. Shuai et al., "An improved YOLOv5-based method for multi-species tea shoot detection and picking point location in complex backgrounds", Biosystems Engineering, vol. 231, pp. 117–132, 2023, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2023.06.007.

9. H. Yang et al., "Computer vision-based high-quality tea automatic plucking robot using Delta parallel manipulator", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 181, 2021, doi: 10.1016/j.compag.2020.105946.
10. Y. Zhu et al., "Deviation Tolerance Performance Evaluation and Experiment of Picking End Effector for Famous Tea", *Agriculture*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.3390/agriculture11020128.
11. A. Utamima, M. J. Sulastri, L. Yuniarti, and A. H. Ansariipoor, "Optimizing multi-machine path planning for crop precision seeding with Lovebird Algorithm", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 235, 2025, doi: 10.1016/j.compag.2025.110207.
12. H. Tao, R. Zhang, L. Zhang, D. Zhang, T. Yi, and M. Wu, "Tea Harvest Robot Navigation Path Generation Algorithm Based on Semantic Segmentation Using a Visual Sensor", *Electronics*, vol. 14, no. 5, 2025, doi: 10.3390/electronics14050988.
13. X. Li, J. Yang, X. Wang, L. Fu, and S. Li, "Adaptive Step RRT*-Based Method for Path Planning of Tea-Picking Robotic Arm", *Sensors (Basel)*, vol. 24, no. 23, Dec 4 2024, doi: 10.3390/s24237759.
14. Y. Liu, J. Du, and Q. Zhang, "Performance comparison between A* algorithm and Dijkstra algorithm based on path optimization", *Modern Electronics Technique*, vol. 40, no. 13, pp. 181–183, 2017.
15. W. Wang, Q. Tao, Y. Cao, X. Wang, and X. Zhang, "Robot time-optimal trajectory planning based on improved cuckoo search algorithm", *IEEE access*, vol. 8, pp. 86923–86933, 2020.
16. G. Li and W. Chou, "Path planning for mobile robot using self-adaptive learning particle swarm optimization", *Science China Information Sciences*, vol. 61, no. 5, p. 052204, 2018.
17. Y. Zheng, C. Hang, T. Tang, G. Xiao, and X. Wang, "Research on Tea Harvesting Path Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Based Information Processing and Applications, Volume 2, (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2024, ch. Chapter 43, pp. 497–509.*
18. M. Wu, B. Gao, H. Hu, and K. Hong, "Research on path planning of tea picking robot based on ant colony algorithm", *Measurement and Control*, vol. 57, no. 8, pp. 1051–1067, 2024, doi: 10.1177/00202940241228996.
19. L. Zhang, "Tea Leaf Picking Path Planning Based on an Improved Ant Colony Optimization Algorithm", *International Journal of Knowledge and Innovation Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 12–25, 2025, doi: 10.56578/ijkis030102.
20. C. Zhang et al., "Three-dimensional continuous picking path planning based on ant colony optimization algorithm", *Plos one*, vol. 18, no. 2, p. e0282334, 2023.
21. A. Lambora, K. Gupta, and K. Chopra, "Genetic algorithm-A literature review", in *2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon)*, 2019: IEEE, pp. 380–384.
22. T. Bektaş and L. Gouveia, "Requiem for the Miller–Tucker–Zemlin subtour elimination constraints", *European Journal of Operational Research*, vol. 236, no. 3, pp. 820–832, 2014.

Сведения об авторах

Янь Ян, преподаватель, Чунцинский университет искусств и наук, проспект Хунхэ, 319, район Юнчуань, Чунцин, 402160, КНР, тел. +86 13671763156;

Чичерин Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных и автоматизированных производственных систем, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева», ул. Весенняя, 28, г. Кемерово, Россия, 650000, тел. +79059121187, e-mail: chicivan@yandex.ru;

Чжао Лицзюнь, доктор технических наук по механизации сельского хозяйства, профессор, Чунцинский университет искусств и наук, проспект Хунхэ, 319, район Юнчуань, Чунцин, 402160, КНР, тел. +86 19946965218;

Си Тао, преподаватель, Чунцинский университет искусств и наук, проспект Хунхэ, 319, район Юнчуань, Чунцин, 402160, КНР, тел. +86 17723560714;

Ан Чао, преподаватель, Чунцинский университет искусств и наук, проспект Хунхэ, 319, район Юнчуань, Чунцин, 402160, КНР, тел. +86 18375693224.

Information about authors

Yang Yan, lecturer, Chongqing University of Arts and Sciences, 319, Honghe Avenue, Yongchuan District, Chongqing, 402160, P.R.China, tel. +86 13671763156;

Chicherin Ivan Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information and Automated Production Systems, Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, 28, Vesennaya St., Kemerovo, Russia, 650000, tel. +79059121187, e-mail: chicivan@yandex.ru;

Zhao Lijun, Doctor of Agricultural Mechanization Engineering, professor, Chongqing University of Arts and Sciences, 319, Honghe Avenue, Yongchuan District, Chongqing, 402160, P.R.China, tel. +86 19946965218;

Xi Tao, lecturer, Chongqing University of Arts and Sciences, 319, Honghe Avenue, Yongchuan District, Chongqing, 402160, P.R.China, tel. +86 17723560714;

An Chao, lecturer, Chongqing University of Arts and Sciences, 319, Honghe Avenue, Yongchuan District, Chongqing, 402160, P.R.China, tel. +86 18375693224.

ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯМИ АПК И СОЦИАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ СЕЛА

УДК 338.43

Я.С. Никольский

СКВОЗНАЯ ЦИФРОВИЗАЦИЯ МОЛОЧНОЙ ОТРАСЛИ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕХАНИЗМ ВНЕДРЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена теоретическому обоснованию и разработке механизма внедрения сквозной цифровизации в молочной отрасли. Несмотря на очевидные преимущества цифровой трансформации, её практическая реализация сталкивается с серьёзными ограничениями, связанными с санкционным давлением, удорожанием импортного оборудования и дефицитом доступных цифровых решений, что делает тему особенно актуальной. В работе рассматриваются теоретические аспекты сквозной цифровизации молочной отрасли, выявляются основные барьеры внедрения цифровых технологий, а также анализируются положительные и отрицательные факторы, влияющие на цифровую трансформацию предприятий молочной отрасли. Целью исследования является формирование авторского представления о сущности сквозной цифровизации молочной отрасли, выявление ключевых закономерностей и барьеров внедрения, а также определение направлений повышения эффективности цифровой трансформации молочных хозяйств. На основе теоретического анализа научных публикаций, экономической литературы и нормативно-правовых актов установлено, что эффективность государственных программ по цифровизации АПК требует обязательного учёта отраслевой специфики. Автором проведено разграничение понятий «сквозные цифровые технологии» и «сквозная цифровизация» применительно к молочной отрасли, а также предложены пути преодоления проблем внедрения цифровых решений. Разработана авторская трехуровневая архитектура и четырёх-этапный механизм внедрения сквозной цифровизации. Особое внимание уделяется высокой стоимости внедрения как главному барьеру, делающему сквозную цифровизацию доступной преимущественно для крупных агрохолдингов.

Ключевые слова: сквозная цифровизация, цифровая зрелость, сквозные технологии, автоматизация ферм, агропромышленный комплекс, скотоводство, животноводство, молочная отрасль.

END-TO-END DIGITALIZATION OF THE DAIRY INDUSTRY: THEORETICAL ASPECTS AND IMPLEMENTATION MECHANISM

Abstract. This article explores the theoretical rationale and development of a mechanism for implementing end-to-end digitalization in the dairy industry. Despite the obvious advantages of digital transformation, its practical implementation faces significant limitations related to sanctions, rising costs of imported equipment, and a shortage of affordable digital solutions, making this topic particularly relevant. This paper examines the theoretical aspects of end-to-end digitalization in the dairy industry, identifies the main barriers to implementing digital technologies, and analyzes the positive and negative factors influencing the digital transformation of dairy enterprises. The aim of this study is to develop the author's understanding of the essence of end-to-end digitalization in the dairy industry, identify key patterns and barriers to implementation, and identify areas for improving the effectiveness of digital transformation at dairy farms. Based on a theoretical analysis of scientific publications, economic literature, and regulatory documents, it has been established that the effectiveness of government programs for digitalization of the agro-industrial complex requires mandatory consideration of industry specifics. The author distinguishes between the concepts of «end-to-end digital technologies» and «end-to-end digitalization» in the dairy industry and proposes ways to overcome the challenges of implementing digital solutions. A three-tier architecture and a four-stage mechanism for implementing end-to-end digitalization have been developed. Particular attention is paid to the high cost of implementation as the main barrier, making end-to-end digitalization primarily accessible to large agricultural holdings.

Keywords: end-to-end digitalization, digital maturity, end-to-end technologies, farm automation, agro-industrial complex, cattle breeding, livestock farming, dairy industry.

Введение. Продовольственная безопасность Российской Федерации как независимого государства зависит от различных политических, экономических и социальных факторов, воздействующих на развитие предприятий агропромышленного комплекса (АПК). Одним из главных и жизненно необходимых продуктов питания является молочная продукция, что, в частности, и закреплено в Доктрине продовольственной безопасности страны. Несмотря на то, что молочное производство в Российской Федерации достигает значительных показателей, тем не менее отрасль сталкивается с рядом системных вызовов, среди которых: низкая рентабельность производства, высокая себестоимость продукции, дефицит квалифицированных кадров, изношенность основных фондов, жёсткая конкуренция со стороны импортной продукции (прежде всего из Республики Беларусь), а также ужесточение требований к отслеживанию продукции со стороны ветеринарных служб.

В связи с этим возникает необходимость в поиске новых факторов конкурентоспособности, и одним из наиболее перспективных направлений, по мнению автора, выступает сквозная цифровизация. В современных условиях цифровизация становится не просто конкурентным преимуществом, а необходимым условием выживания предприятий. Как отмечают Е. А. Ляскова и К. М. Григорьева «главным драйвером развития экономических систем, выраженного в ускорении темпов технологических изменений, выступают цифровизация и цифровые технологии» [1]. Особую значимость цифровая трансформация приобретает в контексте обеспечения национального технологического суверенитета. По справедливому замечанию С. В. Ештокина, «суверенитет государства не может быть частичным, фрагментарным – необходимо в одинаковой степени развивать и укреплять политический, экономический и технологический суверенитет» [2].

© Никольский Я. С., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Особенно отчётливо это стало пониматься после того, как начала реализовываться санкционная политика, проводимая недружественными государствами в отношении России, начиная с 2014 года и усиленная после 2022 года. Несмотря на это, российское государство в сложившихся условиях осуществляет активную работу по поддержке отечественных предприятий АПК. В условиях санкционного давления 2022–2026 гг. ситуация дополнительно осложняется уходом западных вендоров (DeLaval, GEA, AfiFarm), прекращением технической поддержки программного обеспечения и удорожанием оборудования через параллельный импорт на 40–70 % [3]. Как отмечается в парламентских слушаниях (февраль 2026 г.), «высокая ключевая ставка и удорожание техники привели к снижению объёмов приобретения новой сельхозтехники в 2025 году на 35 %» [4]. В этом контексте сквозная цифровизация молочной отрасли выступает не только инструментом повышения эффективности, но и элементом обеспечения технологической независимости АПК. Касательно данной проблематики, Л. А. Овсянко и Р. В. Майер отмечают, что «в условиях импортозамещения в молочное скотоводство активно внедряются современные технологии. В производстве молока наиболее востребованными вложениями являются роботы-дояры» [5]. Т. Е. Кирилова, анализируя специфику молочного скотоводства, выделяет такие барьеры, как ограниченный доступ к широкополосному интернету в сельских районах, недостаточный объём государственной поддержки, нехватку финансовых ресурсов, низкий уровень цифровой компетентности работников и отсутствие чётких стратегий внедрения [6]. Л. В. Зинич с соавторами констатируют, что «цифровизация в сельском хозяйстве преимущественно сводится к автоматизации отдельных видов деятельности и бизнес-процессов... происходит скачкообразно» [7]. К числу проблем цифровых решений авторы относят отсутствие синхронизации и интеграции решений друг с другом, разные стандарты и форматы данных, а также отсутствие систем поддержки принятия решений [7, 8].

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью теоретического обоснования и разработки практического механизма внедрения сквозной цифровизации в молочной отрасли с учётом современных санкционных ограничений.

Научная новизна проведённого исследования заключается в уточнении понятия «сквозная цифровизация» применительно к молочной отрасли, выявлении основных закономерностей и барьеров внедрения цифровых технологий с учётом санкционных ограничений, разработке авторской трехуровневой архитектуры с интеграцией ИИ-модулей, предложении четырёхэтапного механизма внедрения, а также в определении направлений повышения эффективности цифровой трансформации молочных хозяйств через импортозамещение программного обеспечения.

Целью исследования является формирование авторского представления о сущности сквозной цифровизации молочной отрасли, проведение анализа современного состояния цифровизации молочного скотоводства и определение возможных направлений повышения эффективности цифровой трансформации молочных хозяйств, то есть теоретическое обоснование концепции сквозной цифровизации молочной отрасли и разработка механизма её внедрения с учётом современных вызовов (санкционные ограничения, удорожание оборудования, уход западных вендоров, необходимость интеграции ИИ-модулей для предиктивного управления).

Материалы и методы исследования. При проведении данного исследования автором использовались как общенаучные, так и специальные экономические методы. Базовыми выступили общенаучные методы познания: анализ, синтез, индукция и дедукция. Кроме того, применялись специальные экономические методы: монографический, абстрактно-логический и сравнительный анализ. Для изучения понятийного аппарата были проанализированы научные публикации российских и зарубежных авторов, а также нормативно-правовые акты в сфере цифровизации АПК. С целью выявления барьеров внедрения проведён анализ отраслевых обзоров, материалов парламентских слушаний, а также данных о параллельном импорте и удорожании оборудования. Эмпирическую базу исследования составили статистические данные Министерства сельского хозяйства РФ, отраслевые обзоры платформы «Direct.Farm», а также данные о стоимости оборудования из открытых источников и аналитических отчётов.

Основная часть. Для того чтобы выполнить цель данного исследования и решить поставленные задачи обратимся к анализу понятийного аппарата. Итак, в научной литературе сложилось несколько подходов к определению сквозных цифровых технологий. С. В. Ештокин, обобщая нормативно-правовые документы, отмечает, что «сквозные цифровые технологии в своей основе имеют не одну технологическую новацию, а несколько. Соединение технологий (например, распределённого реестра, облачных хранилищ данных и нейросетевых вычислений) образует уникальное сочетание, которое может быть использовано для решения конкретных, порой уникальных целей» [2]. Автор выделяет три ключевых признака: многокомпонентность, широкую применимость и интегральность. Развивая это понимание, следует сказать, что сквозная цифровизация неразрывно связана с понятием цифровой зрелости. Т. Е. Кирилова определяет это понятие, как «степень готовности организации к цифровой трансформации, включая уровень внедрения технологий, автоматизацию процессов, использование данных и способность адаптироваться к изменениям» [6]. При этом, стоит отдельно отметить, что ресурсно-сервисная модель предполагает «оптимальное сочетание внутренних ресурсов хозяйства с внешними сервисами», что позволяет достичь синергетического эффекта при минимальных капитальных затратах [6].

Итак, на основе анализа существующих подходов и с учётом специфики молочной отрасли предлагается следующее авторское определение: сквозная цифровизация молочной отрасли представляет собой процесс интеграции цифровых технологий на всех этапах создания ценности (от генетики и содержания животных до доения, первичной обработки, хранения, транспортировки и реализации готовой продукции), обеспечивающий непрерывный сбор, передачу, обработку и анализ данных в едином информационном пространстве, что позволяет реализовать принципы цифрового двойника и сквозной прослеживаемости, а также принимать управленческие решения в режиме реального времени. К слову, данное определение базируется на пяти ключевых характеристиках, которые наглядно представлены на рисунке 1.

Характеристики, изображённые на рисунке 1, такие как непрерывность, интегральность, сквозная прослеживаемость, предиктивность и адаптивность, формируют концептуальную основу, которая, в свою очередь, является фундаментальной для разработки и внедрения практических механизмов в контексте цифровой трансформации молочного хозяйства. Тем не менее, для более глубокого понимания их значимости и роли в данном процессе целесообразно провести детальный анализ каждого из этих элементов.

Первая характеристика, непрерывность, предполагает круглосуточный сбор данных от всех возможных источников: от животных (через датчики активности, жвачки, температуры), от оборудования (онлайн-анализаторы молока, весы в кормосмесителях) и от окружающей среды (датчики микроклимата). Значимость непрерывного мониторинга обусловлена невозможностью отследить динамику состояния животных и оперативно реагировать на отклонения без постоянного поступления данных. Важно уточнить, что на практике система круглосуточно фиксирует изменения и при обнаружении анома-

лий, например, снижения активности коровы или повышения соматических клеток в молоке, автоматически направляет сигнал зоотехнику или ветеринару.

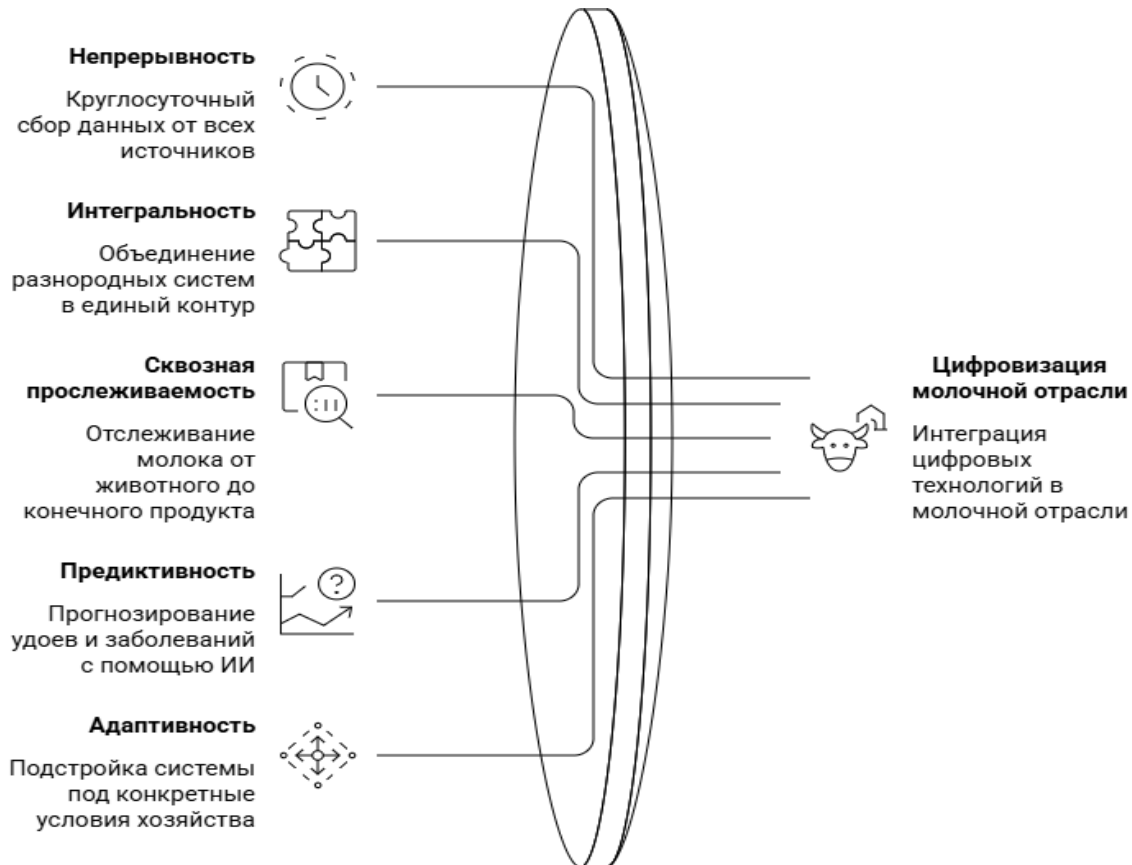


Рис. 1 – Пять ключевых характеристик сквозной цифровизации молочной отрасли

Вторая характеристика, интегральность, заключается в объединении разнородных систем (учёта стада, доения, кормления, ветеринарии) в единый информационный контур. Такая интеграция необходима для того, чтобы данные не хранились разрозненно в различных программах, а были доступны в структурированном виде в одном месте. Технически это реализуется через интеграционную платформу, которая собирает информацию из всех источников, нормализует её и приводит к единому формату, после чего данные становятся доступны для анализа на верхнем уровне управления.

Третья характеристика, сквозная прослеживаемость, представляет собой возможность отследить путь каждой партии молока от конкретного животного до конечного продукта на прилавке. Её ключевая роль обусловлена, во-первых, необходимостью выполнения требований ветеринарного законодательства РФ (система «Меркурий», закон об обязательной маркировке животных и др.), а во-вторых, потребностью в повышении доверия потребителей и получении ценовой премии за качество. Тем самым, практическая реализация предполагает присвоение каждому животному уникального RFID-чипа. В процессе доения система фиксирует, от какого животного получена данная партия молока. В дальнейшем партия отслеживается при перевозке с использованием GPS-трекинга и температурных датчиков, а также при переработке, вплоть до нанесения QR-кода на упаковку, который потребитель может отсканировать и ознакомиться с полной историей продукта.

Четвёртая характеристика, предиктивность, основана на использовании искусственного интеллекта и технологий больших данных для прогнозирования удоев, выявления заболеваний на ранней стадии и определения оптимального времени осеменения. Её внедрение позволяет осуществить переход от реактивного управления, то есть реагирования на уже произошедшее событие, к предиктивному, предполагающему предотвращение проблем до их возникновения. На практике нейросеть анализирует исторические данные и текущие показатели с датчиков (активность, жвачку, температуру, состав молока) и с высокой точностью прогнозирует, например, развитие мастита или кетоза у коровы за 24–48 часов до появления клинических симптомов, что позволяет ветеринару принять меры заблаговременно. Следовательно, это способствует снижению заболеваемости, экономии затрат на лечение и сохранению продуктивности [11].

Пятая характеристика, адаптивность, отражает способность цифровой системы подстраиваться под конкретные условия хозяйства, включая размер фермы, породный состав, климатические особенности и техническую оснащённость. Необходимость адаптивности обусловлена тем, что не существует двух идентичных молочных ферм: решение, эффективное для крупного агрохолдинга, может оказаться непригодным для небольшой семейной фермы. На практике предлагаемая архитектура и механизм внедрения являются модульными, что позволяет хозяйству выбрать только те компоненты, которые ему реально необходимы на текущем этапе, и постепенно наращивать функционал по мере готовности персонала и появления финансовых возможностей. Иными словами, такой подход снижает порог входа в цифровизацию для средних и малых предприятий.

Резюмируя вышесказанное, описанные пять характеристик в своей совокупности образуют полноценную теоретическую базу, позволяющую перейти к рассмотрению отраслевой специфики и тех барьеров, которые сегодня препятствуют внедрению сквозной цифровизации в российских реалиях. Молочная отрасль обладает рядом особенностей, которые требуют особого внимания при внедрении сквозной цифровизации. Биологический характер производства означает, что в отличие от промышленного производства объект управления (животное) обладает изменчивостью, требует индивидуального

подхода, учёта физиологического состояния, поведения и здоровья. Распределённый характер производства проявляется в том, что молочные фермы часто расположены в удалённых сельских территориях с ограниченной доступностью широкополосного интернета, что создаёт дополнительные вызовы для сбора и передачи данных [6]. Высокие требования к прослеживаемости диктуются ветеринарным законодательством, которое требует учёта каждого животного и контроля качества молока на всех этапах. Наконец, инвестиционная ёмкость означает, что внедрение цифровых решений требует значительных капитальных затрат, что особенно актуально в условиях удорожания оборудования через параллельный импорт [3]. К сказанному следует добавить, что в 2026 году ситуация усугубляется рядом дополнительных факторов, которые наглядно представлены на рисунке 2.



Рис. 2 – Ключевые проблемы внедрения сквозной цифровизации в России при санкционном воздействии в 2026 году

Как можно понять из рисунка 2, молочная отрасль Российской Федерации в 2026 году сталкивается с серьёзными вызовами для внедрения сквозной цифровизации [3, 4, 6, 7, 13]. Однако, стоит признать, что часть этих проблем может быть смягчена за счёт грамотной архитектуры и механизмов поддержки. Так, переход на отечественное программное обеспечение («1С:Цифровое животноводство») позволяет снизить зависимость от западных вендоров, а внедрение ИИ-модулей для предиктивной аналитики отчасти компенсирует дефицит квалифицированных кадров, автоматизируя рутинные задачи зоотехника и ветеринара. В свою очередь, высокая стоимость внедрения требует не столько технологических, сколько институциональных решений, а именно: разработки государственных программ субсидирования и льготного кредитования, ориентированных на внедрения цифровизации в молочную отрасль страны. С учётом изложенного, для преодоления перечисленных барьеров разработана авторская трехуровневая архитектура сквозной цифровизации молочной отрасли, схематически представленная на рисунке 3. Предлагаемая архитектура не устраняет макроэкономические и инфраструктурные ограничения, но создаёт технологическую основу, которая в сочетании с государственной поддержкой позволяет сельскохозяйственным организациям, фермерским хозяйствам и молокоперерабатывающим предприятиям поэтапно внедрять цифровые решения, минимизируя риски и снижая порог входа.

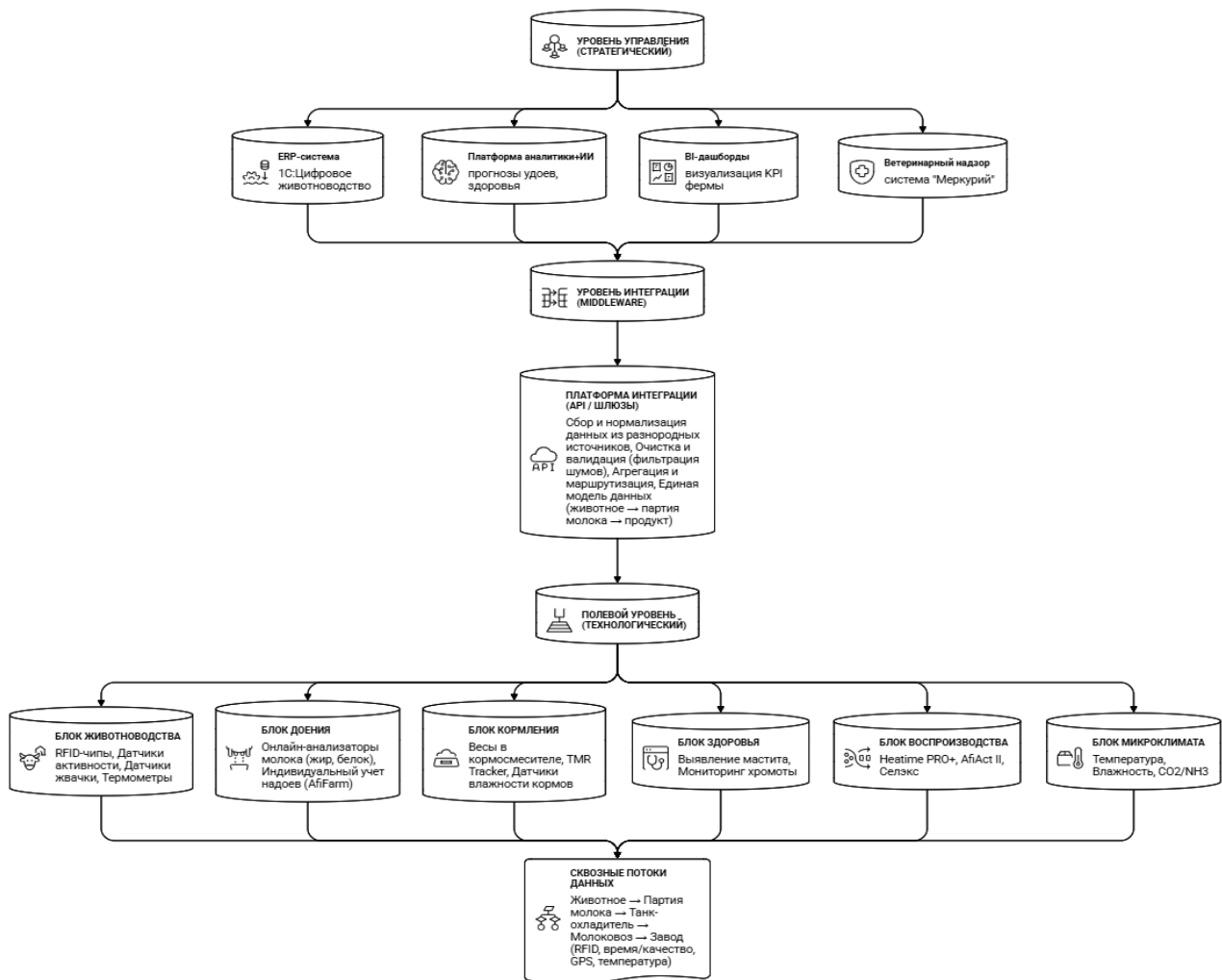


Рис. 3 – Архитектура сквозной цифровизации молочной отрасли

Как видно из представленной схемы (рис. 3), предлагаемая архитектура включает три последовательных уровня. Нижний, полевой уровень собирает первичные данные с RFID-чипов для идентификации животных, датчиков активности и жвачки, онлайн-анализаторов молока (жир, белок, соматические клетки), весов в кормосмесителях, датчиков микроклимата (температура, влажность). Средний уровень интеграции обеспечивает сбор, нормализацию, очистку и маршрутизацию данных от всех датчиков, а также создание единой модели данных, связывающей животное, партию молока и готовый продукт. Именно на этом уровне реализуется «сквозной» характер цифровизации. Верхний уровень управления и аналитики включает ERP-системы, в частности «1С:Цифровое животноводство», платформы аналитики с ИИ-модулями для прогнозирования удоев и раннего выявления заболеваний, BI-дашборды для визуализации ключевых показателей фермы, а также интеграцию с системой ветеринарного надзора «Меркурий» [12, 14, 15]. Отличительной особенностью предлагаемой архитектуры является выделение сквозных потоков данных, проходящих путь от животного через партию молока и танк до молокозавода и завода, где на каждом этапе фиксируются уникальные идентификаторы, временные метки, данные о температуре и GPS-координаты.

В итоге, предложенная архитектура создаёт необходимую технологическую основу для последующего поэтапного внедрения цифровых решений. Имея разработанную архитектуру, перейдём к описанию практического механизма её реализации. Предлагаемый четырёхэтапный механизм внедрения графически представлен на рисунке 4.

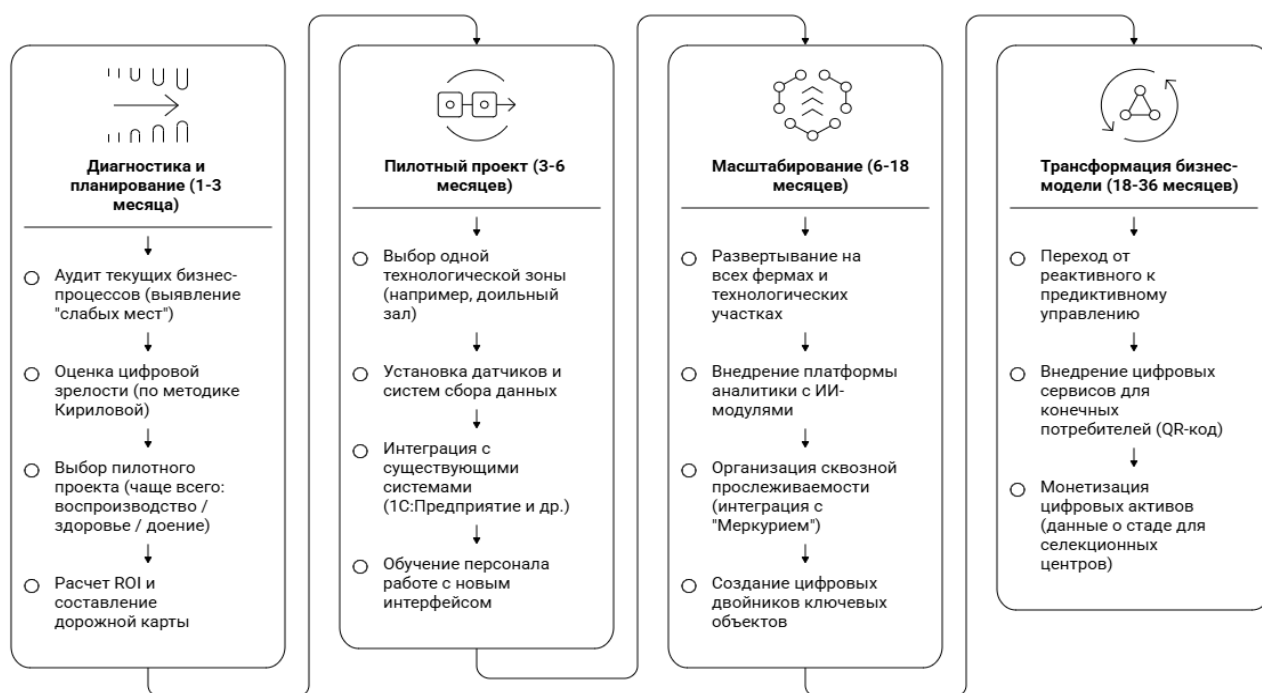


Рис. 4 – Поэтапный алгоритм внедрения сквозной цифровизации в молочную отрасль

Как показано на схеме (рис. 4), предлагаемый механизм состоит из четырёх последовательных этапов. На первом этапе, который занимает от одного до трёх месяцев, проводится диагностика и планирование. Данный этап включает аудит текущих бизнес-процессов, оценку цифровой зрелости по методике Кириловой [6], выбор пилотного проекта (в сфере воспроизводства стада, здоровья животных или доения), расчёт экономической эффективности и составление дорожной карты. Второй этап представляет собой пилотный проект продолжительностью от трёх до шести месяцев. В его рамках осуществляется установка датчиков в доильном зале, интеграция с существующими системами, например с «1С:Предприятие», и обучение персонала работе с новым программным обеспечением [14]. Третий этап посвящён масштабированию и занимает от шести до восемнадцати месяцев. На этом этапе происходит развёртывание цифровых решений на всех фермах, внедрение аналитических платформ с модулями искусственного интеллекта, организация сквозной прослеживаемости через интеграцию с системами «Меркурий» и «Хорриот» [8], а также создание цифровых двойников ключевых объектов. Наконец, четвёртый этап, рассчитанный на период от восемнадцати до тридцати шести месяцев, предполагает трансформацию бизнес-модели. Он включает переход от реактивного управления к предиктивному, внедрение цифровых сервисов для конечных потребителей, в частности QR-кодов на упаковке с историей продукта, и монетизацию цифровых активов, например, передачу анонимных данных о здоровье стада селекционным центрам и фармацевтическим компаниям. Важно отметить, что предлагаемый механизм включает цикл непрерывного улучшения, то есть обратную связь от четвёртого этапа к первому, обеспечивающую постоянное совершенствование цифровых процессов, на основе накопленных данных.

Выводы. Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие выводы.

Во-первых, в рамках теоретического осмысления проблемы было расширено понимание сквозной цифровизации применительно к молочной отрасли. На основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы по тематике исследования было предложено авторское определение, а также выделены пять ключевых характеристик, а именно непрерывность, интегральность, сквозная прослеживаемость, предиктивность и адаптивность. В свою очередь это позволило систематизировать разрозненные представления о цифровой трансформации и адаптировать их к специфике молочного скотоводства.

Во-вторых, анализ современных условий показал, что внедрение сквозной цифровизации в Российской Федерации в 2026 году сталкивается с серьёзными барьерами. К их числу относятся уход западных вендоров и прекращение технической поддержки, удорожание оборудования через параллельный импорт на 40–70 % [3, 13], дефицит квалифицированных кадров, ограниченная интернет-доступность в удалённых районах [6], а также высокая ключевая ставка, делающая кредиты малодоступными [4]. В совокупности вышеописанные факторы создают серьезные трудности для цифровой трансформации молочной отрасли Российской Федерации.

В-третьих, предложенная авторская трехуровневая архитектура включает последовательно полевой уровень, уровень интеграции и уровень управления и аналитики, а также четырёхэтапный механизм внедрения, состоящий из диагностики, пилотного проекта, масштабирования и трансформации бизнес-модели. Отличительной особенностью разработанного авторского подхода является выделение сквозных потоков данных и наличие цикла непрерывного улучшения.

В-четвёртых, на основе исследования было установлено, что ключевой проблемой сквозной цифровизации является её высокая стоимость, которая в современных российских реалиях становится недоступной для большинства молочных компаний. Ориентировочные затраты на внедрение даже базового комплекса решений для фермы на 600 голов составляют от 10 до 21 млн рублей, что значительно превышает возможности средних и малых хозяйств [13]. Такие инвестиции могут позволить себе только крупные агрохолдинги, тогда как средние и малые предприятия, составляющие основу молочной отрасли страны, оказываются исключёнными из процесса цифровой трансформации. В частности, это создаёт риск усиления цифрового неравенства в отрасли и монополизации преимуществ цифровизации узким кругом крупных игроков.

В заключение стоит подчеркнуть, что сквозная цифровизация молочной отрасли способна внести вклад в обеспечение продовольственной безопасности и повышение конкурентоспособности молочной отрасли, как и, собственно говоря, всего отечественного АПК, однако говорить о полной технологической независимости в современных условиях преждевре-

менно. Значительная часть высокотехнологичного оборудования (датчики, онлайн-анализаторы, роботизированные доильные системы) и программного обеспечения (DairyPlan, AfiFarm, DelPro) имеет иностранное происхождение, а их замещение отечественными аналогами находится на начальной стадии. В этой связи технологическая независимость должна рассматриваться не как данность, а как долгосрочный вектор развития, требующий системной работы по созданию собственной компонентной базы и импортозамещению критически важных цифровых решений. Кроме того, высокая стоимость внедрения и недоступность комплексных цифровых решений для большинства средних и малых молочных хозяйств требуют пересмотра существующего подхода. По мнению автора, необходима разработка государственных механизмов поддержки, включающих субсидирование, льготное кредитование и налоговые послабления, а также создание более доступных облачных и коробочных решений, ориентированных на средние и малые предприятия. В противном случае цифровая трансформация молочной отрасли останется уделом лишь крупных агрохолдингов, что не позволит достичь ожидаемого экономического эффекта в масштабах всей отрасли. Приоритетным направлением государственной политики должно стать стимулирование разработки и производства отечественного цифрового оборудования и программного обеспечения, поскольку только опора на собственные технологические решения может в долгосрочной перспективе обеспечить подлинную технологическую независимость молочной отрасли Российской Федерации.

Библиография

1. Ляскова Е.А., Григорьева К.М. Диагностика готовности российских регионов к внедрению цифровых технологий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2023. Т. 17, № 2. С. 34–49.
2. Ештокин С.В. Сквозные технологии цифровой экономики как фактор формирования технологического суверенитета страны // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 3. С. 1301–1314.
3. Параллельный импорт в АПК: итоги 2025 года и прогноз на 2026. М. : Национальный союз агростраховщиков, 2026. 56 с.
4. Стенограмма парламентских слушаний «Стратегические направления развития АПК в современных условиях санкционного давления» (Комитет по аграрным вопросам, февраль 2026 г.). URL: <http://komitet2-6.km.duma.gov.ru/> (дата обращения: 06.04.2026).
5. Овсянко Л.А., Майер Р.В. Исследование инвестиций в цифровизацию производства молока в регионе // Продовольственная политика и безопасность. 2025. Т. 12, № 3. С. 629–640.
6. Кирилова Т.Е. Ресурсно-сервисное обеспечение цифровой зрелости архитектуры сельскохозяйственных организаций молочного направления // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17, № 2. С. 1–10.
7. Зинич Л.В., Кузнецова Н.А., Астахова Е.А. Дорожная карта цифровой трансформации сельскохозяйственных организаций // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 12. С. 5717–5726.
8. Цифровизация молочных ферм в России в 2025 году [Электронный ресурс] // Direct.Farm. 2025. 26 марта. URL: <https://direct.farm/post/tsifrovizatsiya-molochnyk>
9. Liu E., Yang H., Sharma S., van Leerdam M.B., Niu P., VandeHaar M.J., Hostens M. Agents are all you need: Pioneering the use of agentic artificial intelligence to embrace large language models into dairy science // Journal of Dairy Science. 2025. Vol. 108, № 12. P. 14038–14049. DOI: 10.3168/jds.2025-26775.
10. Selvaggi R., Lusk J.L., Pappalardo G. Eliciting dairy farmers' willingness to pay for digital devices for Precision Livestock Farming // Journal of Rural Studies. 2025. Vol. 119. P. 103772. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2025.103772.
11. Fotiadis D.A., Markopoulos L.S., Zacharia S.D. Farmanagers: end-to-end data automation and carbon footprint modeling for dairy sheep and goat farms // Smart Agricultural Technology. 2026. Vol. 14. P. 101980. DOI: 10.1016/j.atech.2026.101980.
12. Государственная информационная система в области ветеринарии: Автоматизированная информационная система «Меркурий» [Электронный ресурс]. URL: <https://mercury.vetr.ru/> (дата обращения: 06.04.2026).
13. Оборудование для переработки молока [Электронный ресурс]. URL: <https://agroserver.ru/oborudovanie-pererabotka-moloka/> (дата обращения: 06.04.2026).
14. 1С: Цифровое животноводство. Оперативный учет и управление производством. КРС // Отраслевые и специализированные решения 1С:Предприятие. URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/mes-krs/features> (дата обращения: 05.04.2026).
15. Никулина Ю.Н. Эффективность цифровизации сельского хозяйства: региональный кейс производителей молока // АПК: Экономика, управление. 2023. № 8. С. 45–54. DOI: 10.33305/238-45.

References

1. Lyaskovskaya E.A., Grigorieva K.M. Diagnostics of the Readiness of Russian Regions to Implement Digital Technologies // Bulletin of SUSU. Series «Economics and Management». 2023. Vol. 17, № 2. Pp. 34–49.
2. Yeshtokin S.V. End-to-end technologies of the digital economy as a factor in the formation of the country's technological sovereignty // Issues of Innovative Economics. 2022. Vol. 12, № 3. Pp. 1301–1314.
3. Parallel imports in the agro-industrial complex: results of 2025 and forecast for 2026. Moscow : National Union of Agricultural Insurers, 2026. 56 p.
4. Transcript of parliamentary hearings «Strategic Directions for Development of the Agro-Industrial Complex in the Current Context of Sanctions Pressure» (Committee on Agrarian Issues, February 2026). URL: <http://komitet2-6.km.duma.gov.ru/> (date of access: 06.04.2026).
5. Ovsyanko L.A., Mayer R.V. Study of Investments in Digitalization of Milk Production in the Region // Food Policy and Security. 2025. Vol. 12, № 3. Pp. 629–640.
6. Kirilova T.E. Resource and Service Support for Digital Maturity of the Architecture of Agricultural Dairy Organizations // Bulletin of Eurasian Science. 2025. Vol. 17, № 2. Pp. 1–10.
7. Zinich L.V., Kuznetsova N.A., Astashova E.A. Roadmap for the digital transformation of agricultural organizations // Economy, entrepreneurship and law. 2023. Vol. 13, № 12. Pp. 5717–5726.
8. Digitalization of dairy farms in Russia in 2025 [Electronic resource] // Direct.Farm. 2025. March 26. URL: <https://direct.farm/post/tsifrovizatsiya-molochnyk>
9. Liu E., Yang H., Sharma S., van Leerdam M.B., Niu P., VandeHaar M.J., Hostens M. Agents are all you need: Pioneering the use of agentic artificial intelligence to embrace large language models into dairy science // Journal of Dairy Science. 2025. Vol. 108, № 12. P. 14038–14049. DOI: 10.3168/jds.2025-26775.

10. Selvaggi R., Lusk J.L., Pappalardo G. Eliciting dairy farmers' willingness to pay for digital devices for Precision Livestock Farming // *Journal of Rural Studies*. 2025. Vol. 119. P. 103772. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2025.103772.
11. Fotiadis D.A., Markopoulos L.S., Zacharia S.D. Farmanagers: end-to-end data automation and carbon footprint modeling for dairy sheep and goat farms // *Smart Agricultural Technology*. 2026. Vol. 14. P. 101980. DOI: 10.1016/j.atech.2026.101980.
12. State information system in the field of veterinary medicine: Automated information system «Mercury» [Electronic resource]. URL: <https://mercury.vetrif.ru/> (date of access: 06.04.2026).
13. Milk processing equipment [Electronic resource]. URL: <https://agroserver.ru/oborudovanie-pererabotka-moloka/> (date of access: 06.04.2026).
14. 1C: Digital Livestock Farming. Operational Accounting and Production Management. Cattle // *Industry and Specialized Solutions 1C: Enterprise*. URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/mes-krs/features> (accessed: 05.04.2026).
15. Nikulina Yu.N. Efficiency of Digitalization of Agriculture: A Regional Case of Milk Producers // *AIC: Economics, Management*. 2023. № 8. Pp. 45–54. DOI: 10.33305/238-45.

Сведения об авторах

Никольский Ярослав Сергеевич, аспирант кафедры региональной экономики, НГУЭУ, ул. Каменская, 52, Новосибирск, Новосибирская обл., Россия, 630099, e-mail: nikolsky1996@yandex.ru, тел.+7 9538803033.

Information about authors

Nikolsky Yaroslav Sergeevich, postgraduate student, Department of Regional Economics, NSUEM, Kamenskaya St., 52, Novosibirsk, Novosibirsk region, Russia, 630099, e-mail: nikolsky1996@yandex.ru, tel. +7 9538803033.

УДК 657.47:633.635

Л.А. Решетняк, Н.Ю. Яковенко

ПУТИ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Аннотация. Производственная деятельность любого коммерческого предприятия связана с издержками, на основании которых исчисляется себестоимость произведенной продукции. При ее реализации возникают так называемые коммерческие расходы (расходы на продажу), которые увеличивают себестоимость проданной продукции. В свою очередь себестоимость является базой для установления цены продажи продукции, которая обеспечивает предприятию получение выручки. Конечный финансовый результат зависит, соответственно, от суммы выручки, полученной от реализации продукции и издержек производства и реализации продукции.

Таким образом, требуется постоянный контроль произведенных издержек, их анализ и выявление мероприятий, направленных на их снижение. А также выявление резервов увеличения объемов производства.

Повысить валовое производство продукции растениеводства возможно за счет различных факторов, основными из которых являются ликвидация потерь при уборке урожая, расширения посевных площадей, улучшения агротехнологических мероприятий и других. Немаловажное значение имеет также полное использование имеющихся посевных площадей, структура посевов, применение более урожайных сортов сельскохозяйственных культур и другие.

Основными путями снижения производственных издержек являются предотвращение необоснованного перерасхода затрат в сравнении с нормативными (плановыми) показателями. Особое внимание при этом уделяется управленческим расходам, которые чаще всего в структуре себестоимости занимают немалый удельный вес.

В статье показана значимость издержек производства, их влияние на себестоимость продукции. Детально проанализированы издержки производства (расходы по обычным видам деятельности), а также управленческие и коммерческие расходы. Представлены факторы, которые оказывают значительное влияние на объем производства и себестоимость продукции. Определены пути увеличения валового производства продукции растениеводства на предприятии. Показано влияние рассчитанных резервов на финансовый результат от продажи продукции по ее видам.

Ключевые слова: издержки, себестоимость, расходы по обычным видам деятельности, коммерческие расходы, управленческие расходы, финансовые результаты, эффективность, рентабельность.

WAYS TO REDUCE THE COST OF CROP PRODUCTION

Abstract. The production activities of any commercial enterprise incur costs, which are used to calculate the cost of manufactured products. Sales incur so-called selling expenses (commercial expenses), which increase the cost of goods sold. This cost, in turn, is the basis for setting the selling price of products, which ensures the company's revenue. The final financial result depends, accordingly, on the amount of revenue received from product sales and the costs of production and sales.

Therefore, constant monitoring of incurred costs, their analysis, and the identification of measures aimed at reducing them are required, as well as the identification of potential for increasing production volumes.

Increasing gross crop production is possible through various factors, the main ones being the elimination of harvest losses, expansion of cultivated areas, improvement of agricultural practices, and others. Also of no small importance are the full utilization of available cultivated areas, cropping patterns, the use of higher-yielding crop varieties, and other factors.

The primary means of reducing production costs is to prevent unjustified cost overruns compared to standard (planned) indicators. Particular attention is paid to administrative expenses, which often account for a significant share of the cost structure.

This article demonstrates the importance of production costs and their impact on product costs. It analyzes production costs (expenses related to ordinary activities), as well as administrative and commercial expenses, in detail. Factors that significantly influence production volume and product costs are presented. Paths to increasing the enterprise's gross crop production are identified. The impact of calculated reserves on the financial results from product sales by type is demonstrated.

Keywords: costs, prime cost, operating expenses, commercial expenses, management expenses, financial results, efficiency, profitability.

Цель деятельности любой коммерческой организации заключается в получении максимума прибыли. Основную массу прибыли предприятие получает от реализации собственной произведенной продукции, производственный процесс которой связан с издержками, которые затрачивает предприятие при ее выращивании и далее при реализации.

Одним из градообразующих предприятий Белгородской области является ООО «Русагро-Инвест», которое входит в ГК «Русагро». Предприятие занимается выращиванием продукции растениеводства.

ООО «Русагро-Инвест» еще в 2018 г. вместе с другими сельскохозяйственными организациями группы компаний, как сельскохозяйственном сегменте группы компаний, начало внедрять концепцию цифровизации бизнес-процессов и стратегии цифровой трансформации системы управления. Одной из составляющих такой концепции является обеспечение оперативного управления производственными операциями в системе в автоматическом режиме с использованием инструментов оптимизации.

ООО «Русагро-Инвест» успешно развивающееся предприятие, но в отчетном году предприятие получило убыток.

Основные экономические показатели деятельности предприятия представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Экономическая эффективность деятельности ООО «Русагро-Инвест»

Показатели	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Отклонение 2025 г. от 2023 г.	
				(+;-)	%
Стоимость валовой продукции (по себестоимости), тыс. руб.	9940738	10372751	11833307	1892569	119,04
Среднегодовая стоимость основных средств, тыс. руб.	17643847	1826198	20607078	2963231	116,79
Выручка от продажи продукции (работ, услуг), тыс. руб.	28139330	20908839	16502926	-11636404	58,65
Коммерческая себестоимость реализованной продукции (работ, услуг), тыс. руб.	19628818	17499337	17300124	-2328694	88,14
Площадь сельскохозяйственных угодий, га	308199	301855	298759	-9440	96,94
Прибыль (+), убыток (-) от продаж, тыс. руб.	8510512	3409502	-797198	-9307710	-9,37
Чистая прибыль (+), убыток (-), тыс. руб.	6863544	1841830	-2413528	-9277072	35,16
Среднегодовая численность работников, чел.	1971	1980	1965	-6	99,70
Производительность труда, тыс. руб.	5043,5	5238,76	6022,04	978,54	119,40
Выход на 100 га с.-х. угодий, ц:					
- валовой продукции, тыс. руб.	3225,43	3436,34	3960,82	735,39	122,80
- денежной выручки, тыс. руб.	9130,25	6926,78	5523,83	-3606,42	60,50
- чистой прибыли, тыс. руб.	2226,98	610,17	-807,85	-3034,83	-36,28
Фондоотдача, руб.	1,77	1,95	0,57	-1,2	32,44
Уровень рентабельности (убыточности) продаж, %	30,24	16,31	-4,83	-35,07	-
Уровень рентабельности (убыточности) деятельности, %	34,97	10,53	-13,95	-48,92	-

Как показывают данные таблицы, за анализируемый период произведено валовой продукции на сумму 11833307 тыс. руб., что на 19,04 % или 1892569 тыс. руб. выше базисного 2023 г. Однако предприятие в отчетном году получило от продажи продукции убыток в сумме 797198 тыс. руб. несмотря на то, что коммерческая себестоимость несколько снизилась на 11,86 % или на 2328694 тыс. руб.

В целом по предприятию получен убыток в размере 2413528 тыс. руб., в результате чего финансовый результат деятельности предприятия снизился на 64,84 %. Основной тому причиной послужил рост так называемых прочих расходов, которые в 2025 г. составили 2369319 тыс. руб. Это привело к отрицательному уровню рентабельности, как продаж, так и деятельности предприятия в целом, который составил соответственно 4,83 % и 13,95 % соответственно.

Из сказанного следует, что эффективность предприятия в отчетном году резко снизилась.

Как отмечалось нами ранее, полная коммерческая себестоимость включает в себя производственную себестоимость, то есть затраты, связанные с производством продукции, а также коммерческие и управленческие расходы, которые оказывают существенное влияние на финансовый результат, полученный от продажи продукции [5].

Проанализируем производственные издержки (расходы по обычным видам деятельности) на примере данных таблицы 2.

Таблица 2 – Расходы по обычным видам деятельности ООО «Русагро-Инвест», тыс. руб.

Вид расходов	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Отклонения 2025 г. (+;-)от	
				2023 г.	2024 г.
Материальные затраты	10969000	11707256	11833307	864307	126051
Затраты на оплату труда	1809543	2216726	2137977	328434	-78749
Отчисления на социальные нужды	555854	672172	692079	136225	19907
Амортизация	1305669	1126173	1156461	-149208	30288
Прочие затраты	1290312	1200879	1595159	304847	394280
Итого	15933378	16923206	17414983	1481605	491777

Как показывают представленные в таблице данные на протяжении последних трех лет практически по всем элементам наблюдается увеличение затрат на производство продукции. В частности материальные затраты выросли в отчетном году в сравнении с базисным годом на 864307 тыс. руб., с прошлым на 126051 тыс. руб. Затраты на оплату труда увеличились на 328434 тыс. руб. в сравнении с базисным годом, но снизились в сравнении с прошлым годом на 78749 тыс. руб., причиной тому послужило снижение среднегодовой численности работников.

Затраты на амортизацию снизились в сравнении с 2023 г. на 149208 тыс. руб., но напротив, возросли с прошлым годом на 30288 тыс. руб.

Большая сумма затрат и тенденция увеличения наблюдается по прочим затратам, в состав которых включают налоги, аренду, командировочные расходы административно – управленческого персонала, добровольное страхование и др. В сравнении с прошлым годом они выросли на 394280 тыс. руб., с базисным на 304847 тыс. руб.

В целом наблюдается увеличение затрат как с прошлым, так и с базисным годом на 491777 тыс. руб. и 1481605 тыс. руб. соответственно.

В состав издержек помимо расходов, связанных с производством продукции входят также коммерческие и управленческие расходы, увеличение которых снижает финансовый результат от продажи продукции [1].

Проанализируем состав и динамику указанных расходов на примере данных таблицы 3.

Анализируя данные таблицы 3, можно отметить, что в целом за указанный период наблюдается снижение коммерческих расходов в отчетном году на 920091 тыс. руб. в сравнении с базисным годом и 363181 тыс. руб. с прошлым годом. При этом наибольшее уменьшение прослеживается по внутрипроизводственным перемещениям, которые снизились с 704130 тыс. руб. в 2023 г. до 152645 тыс. руб. в 2025 г. В то же время несколько выросли услуги по хранению зерна в отчетном году в сравнении с прошлым годом на 146643 тыс. руб.

Что касается управленческих расходов, то они также за анализируемый период выросли как в сравнении с прошлым годом, так и с базисным на 160882 тыс. руб. и 427038 тыс. руб. соответственно.

Таблица 3 – Коммерческие и управленческие расходы ООО «Русагро-Инвест», тыс. руб.

Виды расходов	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Отклонения 2025 г. от 2023 г. (+;-)	
				2023 г.	2024 г.
Коммерческие расходы					
Услуги по хранению (элеваторов)	381402	184421	331084	-50318	146663
Внутрипроизводственные перемещения	704130	478463	152645	-551485	-325818
Потери и недостачи в пределах норм естественной убыли	28392	21720	8666	-19726	-13054
Амортизация	187912	140780	106429	-81483	-34351
Заработная плата	263046	258104	198473	-64573	-59631
Страховые выплаты	82844	80483	62286	-20558	-18197
Иные коммерческие расходы	667568	594410	535620	-131948	-58790
Итого	2315294	1758384	1395203	-920091	-363181
Управленческие расходы					
Заработная плата	333730	441406	566692	232962	125286
Страховые выплаты	91179	143707	169936	78757	26229
Информационные услуги	410052	559910	588721	178669	28811
Резерв по премиям	85544	115047	68302	-17242	-46745
Иные управленческие расходы	230706	157357	184598	-46108	27241
Итого	1151211	1417427	1578249	427038	160822

Наибольшее увеличение наблюдается по заработной плате управленческого персонала в сравнении с 2023 г. на 232962 тыс. руб. и с прошлым годом на 125286 тыс. руб. В то же время снизился резерв по премиям на 46745 тыс. руб. в сравнении с прошлым годом и с базисным на 17242 тыс. руб.

Более наглядно тенденция изменения всех расходов показана на рисунке 1.

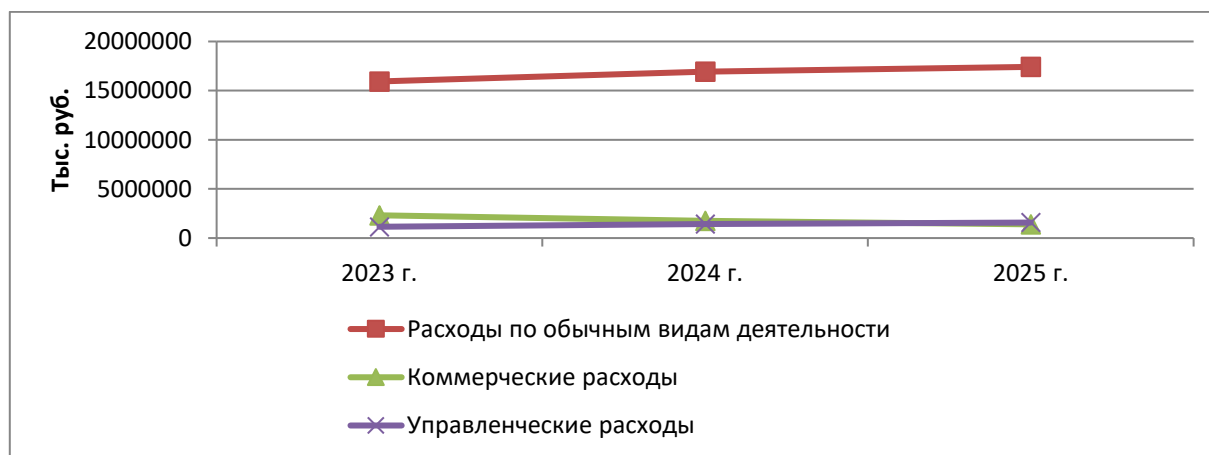


Рис. 1 – Динамика расходов на производство продукции растениеводства в ООО «Русагро-Инвест», 2025 г.

Таким образом, одним из направлений повышения экономической эффективности производства в целом, так и отдельных видов продукции, является снижение издержек, а следовательно, и себестоимости продукции. Поскольку себесто-

имость каждого вида продукции рассчитывается отношением суммы затрат к объему произведенной продукции, то для ее уменьшения необходимо не только снижать издержки, но и наращивать объем производства [2, 4].

В первую очередь на объем производства продукции растениеводства оказывает влияние урожайность, на которую в свою очередь влияют как климатические условия, так и технологические особенности производства. В частности на урожайность сельскохозяйственных культур оказывают влияние качество почвы, соблюдение сроков посева, период и доза внесения удобрений, своевременность обработки от вредителей и сорняков, уборка урожая в оптимальные сроки и др. А также технология обработки почвы, применяемая сельскохозяйственная техника, квалификация и компетентность работников отрасли растениеводства и управленцев. Не соблюдение технологических процессов на какой-либо одной стадии может привести к снижению урожайности, росту затрат, в дальнейшем к увеличению себестоимости продукции и снижению прибыли [3].

Следует отметить, что ООО «Русагро-Инвест» имеет в своем распоряжении необходимые ресурсы для оптимизации технологических процессов в отрасли растениеводства. Но учитывая, что полученная урожайность на предприятии несколько ниже фактической урожайности в Белгородской области, ООО «Русагро-Инвест» имеет резервы увеличения объемов производства.

Возможные резервы увеличения валового сбора, а, следовательно, и снижения издержек производства рассмотрим по данным, приведенным в таблицах ниже.

Таблица 4 – Увеличения производства продукции растениеводства за счет своевременной уборки посевов, 2025 г.

Культуры	Площадь, га		Неубранная площадь, га	Резерв увеличения сбора продукции, ц	
	посеянная	убранная		с 1 га	со всей площади
Зерновые и зернобобовые	79781,07	78533,03	1248,04	47,98	59880,96
Соя	79529,55	78967,32	562,23	20,39	11463,87
Итого	159310,62	157500,35	1810,27	х	71344,83

Следует заметить, что в 2025 г. в ООО «Русагро-Инвест» неубранная площадь составила 1810,27 га, из которых по зерновым и зернобобовым 1248,04 га и сое 562,23 га.

Поэтому при своевременной уборке предприятие могло бы получить 71344,83 ц продукции, в том числе дополнительный объем зерновых составил бы 59880,96 ц, сои 11463,87 ц. По подсолнечнику и сахарной свекле вся посеянная площадь была своевременно убрана.

Кроме того, урожайность в ООО «Русагро-Инвест» в 2025 г. оказалась ниже среднеобластного уровня. При соблюдении технологий выращивания основных сельскохозяйственных культур предприятие также может увеличить валовой сбор (табл. 5).

Таблица 5 – Увеличения валового сбора за счет соблюдения технологии выращивания продукции растениеводства, 2025г.

Вид	Урожайность, ц/га		Дополнительный объем производства с 1 га, ц	Убранная площадь, га	Резерв увеличения валового производства, ц
	ООО «Русагро-Инвест»	Средняя по СХО области			
Зерновые и зернобобовые	47,98	56,7	8,72	78533,03	684808,02
Соя	20,39	22,0	1,61	78967,32	127137,39
Сахарная свёкла	318,51	334,0	15,49	53489,83	828557,47
Итого	х	х	х	210990,2	1640503,88

Наибольшее отклонение в урожайности от средней по области наблюдается по сахарной свекле. В ООО «Русагро-Инвест» в 2025 г. урожайность оказалась меньше на 15,49 ц с га, по зерновым и зернобобовым культурам на 8,72 ц с га. В результате чего дополнительный объем производства мог бы составить 828557,47 ц и 684808,02 ц.

По сое урожайность составила 20,39 ц/га, что на 1,61 ц ниже регионального уровня и недополученный валовой сбор составил 127137,39 ц.

По подсолнечнику получена урожайность, которая практически соответствует средней по области.

В целом упущенная выгода предприятия из-за снижения урожайности ниже среднеобластной составила 1640503,88 ц.

Снижение издержек производства является одним из направлений путей снижения себестоимости продукции. При анализе расходов нами выявлен рост управленческих расходов на протяжении последних трех лет, отдельные статьи которых можно снизить. Это такие, как информационные услуги, а также прочие управленческие расходы, которые в отчетности предприятия не расшифрованы.

Возможный резерв снижения затрат определяется по формуле:

$$P \downarrow C = C_{\text{в}} - C_{\text{ф}} = \frac{3\text{ф} - P \downarrow 3 + 3\text{доп}}{V \text{ВПф} + P \uparrow V \text{ВП}} - \frac{3\text{ф}}{\text{ВПф}}$$

На основании полученных данных рассчитаем резерв снижения себестоимости основных видов продукции растениеводства в ООО «Русагро-Инвест».

1. По зерновым и зернобобовым:

$$P \downarrow C = \frac{3\text{ф} - P \downarrow 3 + 3\text{доп}}{V \text{ВПф} + P \uparrow V \text{ВП}} - \frac{3\text{ф}}{\text{ВПф}} = \frac{2823882 - 0 + 354524,09}{3767798 + 744688,98} - 766,46 = -62,04 \text{ руб.}$$

2. По сое:

$$P \downarrow C = \frac{3\phi - P \downarrow 3 + 3\text{доп}}{V \text{ВП}\phi + P \uparrow V\text{ВП}} - \frac{3\phi}{\text{ВП}\phi} = \frac{3438879 - 0 + 200720,96}{1411358 + 138601,3} - 2436,57 = -88,38 \text{ руб.}$$

3. По сахарной свёкле:

$$P \downarrow C = \frac{3\phi - P \downarrow 3 + 3\text{доп}}{V \text{ВП}\phi + P \uparrow V\text{ВП}} - \frac{3\phi}{\text{ВП}\phi} = \frac{6726135 - 0 + 231954,66}{17037287 + 828557,47} - 394,78 = -5,35$$

Так, за счет увеличения валового производства зерновых и зернобобовых культур в ООО «Русагро-Инвест» с учетом даже дополнительных затрат, связанных с уборкой продукции смогло бы снизить производственную себестоимость 1 ц с 766,46 руб. до 704,42 руб. По сое дополнительный объем в количестве 138601,26 тыс. ц позволил бы снизить себестоимость на 88,38 руб. Дополнительное производство сахарной свеклы в объеме 828557,47 ц позволило бы снизить себестоимость продукции на 5,35 руб. (табл. 6).

Таблица 6 – Внутрихозяйственные резервы увеличения производства основных видов продукции растениеводства, 2025г.

Показатели	Зерновые и зернобобовые	Соя	Сахарная свёкла
– своевременная уборка посевной площади	59880,96	11463,87	-
– повышение урожайности до показателей средних по области	684808,02	127137,39	828557,47
Итого	744688,98	138601,26	828557,47
Резерв снижения себестоимости 1 ц продукции, руб.	-62,04	-88,38	-5,35

Кроме того, дополнительно рассчитанный объем валовой продукции требует и дополнительных затрат не только на уборку, но и транспортировку, реализацию, а также хранение продукции. Так, если на 1 ц реализованной продукции зерновых и зернобобовых культур израсходовано 793,34 руб., в том числе коммерческие расходы составляют 26,88 руб. (793,34 – 766,46). Следовательно коммерческие затраты на дополнительно полученную продукцию составят 20017,24 тыс. руб. (744688,94 ц*26,88 руб.). По сое и сахарной свекле себестоимость продаж 1 ц продукции составила 2468,62 руб. и 394,79 руб., в том числе коммерческие расходы 32,05 руб. по сое, при этом дополнительные коммерческие расходы составляют 26555,27 тыс. руб. По сахарной свекле себестоимость 1 ц проданной продукции соответствует производственной себестоимости и составляет 394,79 руб.

С учетом проведенных расчетов рассмотрим, как изменяться показатели экономической эффективности каждого вида продукции (табл. 7).

Таблица 7 – Влияние предложенных мероприятий на уровень эффективности производства продукции растениеводства

Наименование показателя	2025г.		Изменение	
	Факт	с учетом выявленного резерва	(+; -)	%
Зерновые и зернобобовые				
Выручка от реализации, тыс. руб.	4751836	5721830,63	969994,63	120,41
Коммерческая себестоимость реализованной продукции, тыс. руб.	2894177	3248701,09	354524,09	112,25
Прибыль от продаж, тыс. руб.	1857659	2473129,54	615470,54	133,13
Уровень рентабельности продукции, %	39,09	93,45	54,36	-
Соя				
Выручка от реализации, тыс. руб.	3607447	3984625,38	377178,38	110,46
Коммерческая себестоимость реализованной продукции, тыс. руб.	3272467	3499743,23	227276,23	106,95
Прибыль от продаж, тыс. руб.	334980	484882,15	149902,15	144,75
Уровень рентабельности продукции, %	9,28	12,17	2,89	-
Сахарная свёкла				
Выручка от реализации, тыс. руб.	6587609	6907995,6	320386,6	104,86
Коммерческая себестоимость реализованной продукции, тыс. руб.	6725750	6725750	0	100
Прибыль от продаж, тыс. руб.	-138141	182245,6	320386,6	-131,93
Уровень рентабельности продукции, %	-2,1	2,64	4,74	-

В результате анализа представленных в таблице данных можно отметить, что, выявленные резервы позволяют предприятию увеличить выручку и прибыль от реализации продукции, несмотря на то, что повышается и себестоимость реализованной продукции.

При этом по зерновым культурам возможно увеличение рентабельности на 54,36 %, по сое на 2,89 % и сахарной свекле на 4,74 %. При том, что производство сахарной свеклы в отчетном году на предприятии было убыточным.

Таким образом, изыскивая резервы снижения издержек и повышения валового производства продукции, предприятие тем самым снижает себестоимость продукции, которая является одной из главных составляющих ценовой политики, что в свою очередь позволит увеличить финансовый результат от реализации продукции, а, следовательно, и эффективность ее производства.

Библиография

1. Милова А.В. Влияние управленческих расходов на себестоимость продукции / А. В. Милова, Л. А. Решетняк // Материалы международной студенческой научной конференции, Белгород, 31 марта – 01 2015 года. Том 2. Белгород : Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2015. С. 117. EDN VUDBAJ.
2. Мальцева Е.В. Особенности исчисления себестоимости продукции в сельскохозяйственных предприятиях / Е. В. Мальцева, Л. А. Решетняк // Материалы международной студенческой научной конференции, п. Майский, 07–08 февраля 2017 года. Том 2. п. Майский : Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2017. С. 108. EDN ZITYKN.
3. Наседкина Т.И. Управление затратами как основа формирования себестоимости продукции растениеводства : Монография / Т. И. Наседкина, А. И. Черных, И. А. Демешева. Белгород : Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2021. 151 с. ISBN 978-5-6046582-2-2. EDN QBCKSH.
4. Решетняк Л.А. Калькулирование себестоимости продукции и ее влияние на эффективность производства / Л. А. Решетняк, Н. Н. Шульга // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 4(36). С. 126–132. EDN LGTNBM.
5. Ульянова Ж.А. Система показателей оценки эффективности деятельности сельскохозяйственного предприятия / Ж. А. Ульянова, Е. А. Ананская, Е. А. Базовкина // Экономика и предпринимательство. 2025. № 10(183). С. 892–895. DOI 10.34925/EIP.2025.183.10.146. EDN HKERXQ.

References

1. Milova A.V. The Impact of Management Expenses on the Cost of Production / A. V. Milova, L. A. Reshetnyak // Proceedings of the International Student Scientific Conference, Belgorod, March 31 – January 2015. Vol. 2. Belgorod : Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, 2015. P. 117. EDN VUDBAJ.
2. Maltseva E.V. Features of Calculating the Cost of Production in Agricultural Enterprises / E. V. Maltseva, L. A. Reshetnyak // Proceedings of the International Student Scientific Conference, Maisky, February 7–8, 2017. Vol. 2. Maisky : Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, 2017. P. 108. EDN ZITYKN.
3. Nasedkina T.I. Cost management as a basis for forming the cost of crop production: Monograph / T. I. Nasedkina, A. I. Chernykh, I. A. Demesheva. Belgorod : Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, 2021. 151 p. ISBN 978-5-6046582-2-2. EDN QBCKSH.
4. Reshetnyak L.A. Calculation of the cost of production and its impact on production efficiency / L. A. Reshetnyak, N. N. Shulga // Innovations in the agro-industrial complex: problems and prospects. 2022. № 4(36). Pp. 126–132. EDN LGTNBM.
5. Ulyanova Zh.A. System of indicators for assessing the performance of an agricultural enterprise / Zh. A. Ulyanova, E. A. Ananskaya, E. A. Bazovkina // Economy and entrepreneurship. 2025. № 10(183). P. 892–895. DOI 10.34925/EIP.2025.183.10.146. EDN HKERXQ.

Сведения об авторах

Решетняк Любовь Алексеевна, кандидат экономических наук, доцент экономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел. 74722 39-22-04;
Яковенко Наталья Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент экономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д.1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел. 74722 39-22-04.

Information about authors

Reshetnyak Lyubov Alekseevna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Faculty of Economics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova Street, Maysky Village, Belgorodsky m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, phone number 74722 39-22-04;
Yakovenko Natalya Yurievna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Faculty of Economics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova Street, Maysky Village, Belgorodsky m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, phone number 74722 39-22-04.

УДК 631.17:65.011.44

Д.О. Сергеев, О.В. Закарчевский, С.Б. Карякин

ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНОВОЙ МОДЕЛИ ROBOT-AS-A-SERVICE ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Аннотация. Малые и средние крестьянско-фермерские хозяйства в первую очередь сталкиваются с высокими ценами на сельскохозяйственную технику. По данным Минсельхоза, за последние годы стоимость тракторов увеличилась на 70–80 %, на комбайны – до 40 %, на прочие машины – от 20 % до 50 %. С другой стороны, мы наблюдаем значительно меньшие темпы роста стоимости сельхоз продукции. Таким образом, вопрос оснащённости сельхоз угодий становится всё более острым. Одним из способов решения данной проблемы может стать система Robot-as-a-service. Расчёты, проведённые в данной работе, могут стать основой многих проектов по проектированию дронов и предоставлению услуг по обработке полей в будущем. При реализации методов, описанных в данной статье, сельское хозяйство удовлетворит потребности в технике для работы в поле и позволит снизить порог капиталовложений в закупку техники для малых и средних КФХ. При сборе информации были использованы научные статьи и находящиеся в открытом доступе материалы, указанные в списке литературы. По итогу работы был проведён расчёт рентабельности услуг по обработке полей роботизированными манипуляторами.

Ключевые слова: беспилотные системы, Robot-as-a-Service, экономический расчёт сельскохозяйственных дронов, обработка почвы, расчёт рентабельности.

CALCULATING THE COST OF THE ROBOT-AS-A-SERVICE IN AGRICULTURE

Abstract. Small and medium-sized farms are primarily faced with high prices for agricultural machinery. According to the Ministry of Agriculture, the cost of tractors has increased by 70–80 % in recent years, while the cost of combine harvesters has increased by up to 40 %, and the cost of other machinery has increased by 20–50 %. On the other hand, we are seeing a significantly lower rate of increase in the cost of agricultural products. As a result, the issue of agricultural equipment is becoming increasingly urgent. One solution to this problem is Robot-as-a-service. The calculations performed in this work can become the basis for many drone design projects and field processing services in the future. By implementing the methods described in this article, agriculture can meet the needs for field equipment and reduce the capital investment threshold for small and medium-sized farms. Purpose of the study is calculating the cost of field processing services using robotic manipulators. To prove or disprove the profitability of this method of interaction between the contractor and the customer for both parties. The information was collected using scientific articles and publicly available materials listed in the bibliography. The profitability of field processing services using robotic manipulators has been calculated.

Keywords: unmanned systems, Robot-as-a-Service, economic calculation of agricultural drones, soil treatment, calculating profitability.

Введение. Текущая мировая экономическая ситуация значительно повлияла на многие области российской промышленности. Особенно эти изменения сказались на агропромышленном комплексе: стоимость сельскохозяйственной техники в данной отрасли всегда была довольно высокой, а рентабельность выпускаемой продукции – низкой. Ранее, до отмены дотаций на приобретение сельскохозяйственной техники, вопрос отсутствия парка необходимого оборудования решался поддержкой от государства. Но после отмены помощи аграриям по направлению приобретения крупного оборудования рынок сельскохозяйственной техники стал существенно холоднее: продажи техники и оборудования для сельского хозяйства упали на 21 % (комбайны зерноуборочные и т.д.), и лишь некоторые позиции показали рост [1]. Данная ситуация явно показывает необходимость в поисках новых решений для аграриев по вопросам предоставления техники.

Но подобным вопросом задаются не только владельцы сельхоз угодий: в авиационной промышленности всё чаще встречаются обсуждения о стоимости лётного часа и перехода от модели продажи самолётов для гражданской авиации к предоставлению в пользование компании перевозчику воздушного судна. Таким образом, завод-изготовитель берёт на себя обслуживание летательного аппарата, обеспечивая его готовность к полёту, а компания-перевозчик предоставляет физическим лицам услуги по перемещению из аэропорта в аэропорт [2].

Похожая система может быть реализована при работе с Robot-as-a-Service (RaaS): завод-изготовитель беспилотной машины предоставляет свои системы в пользование компании, которая предоставляет услуги по работе в поле, или же напрямую выполняет заказ по обработке угодий. Осталось разобраться в стоимости «лётного часа» для беспилотного трактора и является ли такая бизнес-модель выгодной для исполнителя и заказчика услуг.

Цель исследования – на основе анализа текущего состояния рынка роботизированной сельскохозяйственной техники выполнить расчёт возможной стоимости услуг по обработке полей с использованием беспилотных мини-тракторов в рамках модели RaaS.

Основная часть. В практике модель RaaS может быть реализована в нескольких основных вариантах: оплата по подписке за определённые услуги, оплата за часы работы без необходимости приобретения оборудования (аренда), либо лизинг. В работе будет рассмотрен вариант оплаты за часы работы в поле, а также рассчитана оптимальная стоимость ставок с примером расчёта и техническими характеристиками машины, её возможностями.

В России подобные решения являются довольно востребованными ввиду острой нехватки кадров в агропромышленном комплексе, старения парка сельскохозяйственной техники и оборудования, и постепенного снижения рентабельности реализуемой продукции. В этих условиях переход от капиталоемких инвестиций (CapEx) к операционным расходам (OpEx), снижает порог входа для фермеров средних и малых хозяйств и ускоряет внедрение цифровых технологий. При системе RaaS заказчик услуг получает следующие преимущества по сравнению с арендой техники: отсутствие необходимости найма



персонала для управления техникой, своевременный ремонт и обслуживание робота силами исполнителя. Помимо этого, как будет установлено далее в расчётах, это также и экономически целесообразно, что повысит рентабельность произведённой в поле продукции

По данным из открытых источников, в 2024 году объём рынка сельскохозяйственной роботехники оценивался в 18,2 млрд. USD (28,5 млрд. USD – для сегмента RaaS), с прогнозом роста до 23,5 млрд. USD (33,6 млрд. USD - для RaaS) в 2025 году. По оценкам рынок предоставления услуг RaaS продолжит расти и достигнет 76,5 млрд. USD уже к 2030 году. В таблицах 1 и 2 приведены показатели по регионам использования и типам роботизированной сельскохозяйственной техники за 2023–2025 годы.

Таблица 1 – Распределение долей рынка роботизированной сельхозтехники, %

Регион	2023 год	2024 год	2025 год
Северная Америка	35	32	38
Европа	28	28	29
Азия	25	25	26
Южная Америка	6	10	5
В других регионах	6	5	2

Мировой рынок роботизированной сельхозтехники демонстрирует ряд заметных тенденций по категориям оборудования. Так, Северная Америка уверенно лидирует и при этом наращивает своё присутствие: доля региона растёт с 35 % в 2023 году до 38 % в 2025 году, что свидетельствует о высоком уровне внедрения автоматизации в агропромышленном комплексе. Европа удерживает стабильное второе место с долей 28–29 % и показывает умеренный рост, сохраняя значительный, хотя и не доминирующий вес в мировом масштабе. Азия, в свою очередь, демонстрирует небольшое снижение доли – с 25 % до 24 %, – что, скорее всего, связано не с абсолютным падением рынка, а с опережающим ростом других регионов. Заметно сокращается присутствие Южной Америки: доля падает с 10 % до 5 %, что может указывать на замедление темпов роботизации сельского хозяйства или перераспределение инвестиций. Доля прочих регионов остаётся минимальной (5–6 %), из чего следует, что рынок сконцентрирован в трёх основных центрах – Северной Америке, Европе и Азии.

Таблица 2 – Удельный вес автоматизированного оборудования в сфере сельского хозяйства, %

Категория	Годы		
	2023	2024	2025
Оборудование для сборки урожая	20	19	15
Автопилотные тракторы	25	28	35
Дроны	34	32	30
Оборудование для прополки и посева	15	14	12
Доильное оборудование	6	7	8

Что касается структуры самого оборудования, то здесь также прослеживаются чёткие сдвиги. В 2023 году самой крупной категорией были дроны (34 % рынка), однако их доля постепенно снижается и к 2025 году составит уже 30 % – вероятно, рынок насыщается либо интерес смещается в сторону иных типов роботов. На первый план выходят автопилотные тракторы: их доля активно растёт – с 25 % в 2023 году до 35 % в 2025 году. Это говорит об ускоренном внедрении автономных тяговых машин взамен традиционных. Оборудование для сборки урожая, напротив, теряет позиции: удельный вес снижается с 20 % до 15 %, возможно, из-за высокой стоимости и сложности роботизации уборочных процессов. Небольшая, но стабильная доля сохраняется у оборудования для прополки и посева (14–15 %), что подтверждает его востребованность при менее динамичном росте. Наименьшую долю занимает доильное оборудование (6–8 %), хотя незначительный рост может быть связан с точечной автоматизацией животноводческих ферм.

В российской доле рынка беспилотных систем для агропромышленного комплекса в 2024 году присутствовали 33 компании. В 2025 году часть зарубежных компаний ввиду санкций и возникших экономических трудностей (например, Lely и Delaval) покинули российский рынок. В свою очередь, отечественные компании получают поддержку в размере 34,4 млрд. руб. и ожидается, что в 2027 году меры будут увеличены до 41,4 млрд. руб. Таким образом, с учётом выделения средств на поддержку развития цифровизации сельского хозяйства, по оценкам экспертов к 2030 году рынок беспилотных систем в России получит 1,1–1,5 трлн. руб. прибыли [3].

Определим, что считаем рентабельностью показатель эффективности использования техники, при котором владелец машины и арендатор получают прибыль. В статье будут рассмотрены показатели, влияющие на расчёт рентабельности. Со стороны исполнителя: амортизация беспилотной машины, техническое обслуживание и ремонт, затраты на производство дрона, топливо и расходные материалы, зарплаты обслуживающего персонала и операторов, доставка робота на место проведения работ. Со стороны заказчика: прибыль от реализации продукции с обработанного поля и расходы на её обработку [4]. Расход на обработку будет рассчитан в сравнении с приобретением техники в собственность.

Для начала расчёта зададим характеристики машины. Роботизированный мини-трактор – современная многофункциональная платформа для сельскохозяйственных и хозяйственных работ. Примем что привод машины – последовательный гибрид с мощностью в 30 лошадиных сил. Это обеспечивает достаточную производительность для решения широкого спектра задач. Среднее значение массы для подобного класса техники – 1200 кг. Беспилотник должен обладать хорошей устойчивостью и надёжностью в эксплуатации, а класс тяги 0,8 позволяет эффективно работать с различным навесным оборудованием. Автономность работы устройства должна составлять от 12 до 20 часов – такого показателя достаточно для продолжительных рабочих циклов без необходимости частой подзарядки или дозаправки. Рабочая скорость мини-тракторов такого типа варьируется от 5 до 20 км/ч, благодаря чему оператор (или система автоматического управления) может подобрать оптимальный темп под конкретную задачу. Стоимость машины не должна превышать 1 500 000 рублей.

Примем следующие значения по продолжительности работы в поле для беспилотной машины, описанной выше:

- вспашка 10 га – 12–20 часов;

- посев 10 га – 5–8 часов;
- уборка сена 10 га – 3–5 часов.

В расходы на обслуживание можно записать замену масла, тормозной жидкости и шин, заправку, диагностику и компьютерную проверку, обслуживание батареи, переукомплектовывание в зависимости от поставленной задачи и затраты на перевозку дрона. Также стоит учесть стоимость работ команды по работе с переукомплектованием машины и выездной бригады, которая занимается пуском машины на месте [5-7].

По данным из открытых источников, обслуживание последовательного гибрида в России обходится около 8500 руб. в месяц. В расходы владельца беспилотного мини-трактора также стоит внести ежемесячную амортизацию: она будет рассчитана на 10 лет и с учётом стоимости машины будет равна 12 500 руб. [8].

Необходимо также учесть и зарплаты сотрудников. Специалисты необходимы для обслуживания машины, выезда на место проведения работ и транспортировки машины до поля (логистика). Условия работы сотрудников и размер заработной платы был определён как 70 000 руб./месяц при графике 5/2 и количестве сотрудников – 3 человека.

В зависимости от сезона могут проводиться работы не только в поле, но и в городских условиях по уборке снега. Также беспилотный мини-трактор может применяться в логистике по доставке грузов. Данный дополнительный функционал машины позволит задействовать оборудование в различных направлениях и исключить простои [9].

Очевидно, что условия аренды техники для малых хозяйств более выгодны с точки зрения капиталовложений. Однако необходимо обозначить условия выгоды для фермера как:

$$C_{ap} < C_c, \text{ либо } C_{ap} = C_c, \quad (1)$$

где C_c – стоимость работ с учётом стоимости покупки техники;

C_{ap} – стоимость работ с учётом затрат на аренду машин.

Для расчёта целесообразности приобретения оборудования в пользование необходимо, учитывать затраты на организацию места хранения и системы эксплуатации машин. Эти вложения должны быть учтены в вычислении амортизации приобретённого транспортного средства [10].

Арендная плата рассчитывается на основе задействования техники в работах следующим образом:

$$C_{ap} = A + C_{ком} + C_{кр} + C_{стр} + C_{пр}, \quad (2)$$

где A – амортизационные отчисления;

$C_{ком}$ – комиссионные вознаграждения арендодателю;

$C_{кр}$ – плата за кредитные ресурсы, использованные арендодателем для приобретения техники;

$C_{стр}$ – выплаты за страхование арендного имущества;

$C_{пр}$ – прочие затраты арендодателя, предусмотренные договором аренды.

Рассмотрим также и неочевидные недостатки покупки техники и пользованием в аренду. Для приобретения техники в постоянное пользование необходимо учитывать также и коэффициент использования машины ($K_{ив}$) по времени (это значение должно быть не менее 0,8). В случае если владелец угодья пользуется арендованной техникой, должны быть учтены следующие аспекты [8]:

1. Оформление документов, загруженность компании, предоставляющей оборудование, и текущее наличие техники (особенно в сезон проведения работ).

2. Стоимость аренды во время продолжительных работ оказывается довольно обременительной для фермерских хозяйств.

Из этого следует вывод: выбор между условиями пользования техникой является не очевидным и требует более детального анализа и разбора экономической составляющей.

Таблица 3 – Экономическая сводка итоговых значений расходов и прибыли в 2025 году

Показатель ежемесячный	Значение
Стоимость техники, млн. руб.	1,5
Ежемесячная амортизация, руб.	12 500
Обслуживание и ремонт, руб.	8 500
Топливо и материалы, руб.	5 000
Зарплаты, руб.	210 000
Логистические расходы, руб.	10 000
Общие ежемесячные расходы, руб.	246 000
Арендная ставка, руб./час	3 500
Загруженность, час/месяц	160
Ежемесячный доход, руб.	560 000
Прибыль, руб.	314 000

Результаты исследований. Из приведённой таблицы видно, что при установленной оплате за 1 час работы в 3 500 руб., месячная прибыль равна 314 000 руб.

Рассмотрим также и барьеры, возникающие при работе с моделью RaaS. В первую очередь стоит учитывать технологическую сложность наземных роботов и их систем автономной работы: для поддержания работы данных элементов необходимо регулярно обновлять ПО и проводить плановый ремонт. Оба процесса требуют высокую квалификацию работников и наличие необходимого оборудования: не только инструмента для демонтажа узлов и деталей механической и электрической систем, но и специальных приборов для загрузки ПО и, в некоторых случаях, калибровки систем машинного зрения.

Несмотря на меры поддержки развития цифровизации сельского хозяйства, уровень роботизации агропромышленного комплекса в России низок по сравнению с лидерами направления. Слабая проработка процессов внедрения беспилотных систем является преградой на пути предоставления услуг в рамках RaaS. Стоит также учитывать сложность с доступом к сети в отдалённых от вышек передачи сигнала связи полях и мест, в которых связь ослаблена ввиду соблюдения мер безопасности.

Нормативно-правовая база в сфере применения беспилотных систем также требует закрепления важных вопросов: на данный момент отсутствуют четкое разграничение ответственности за действия автономной техники, не определены нормы страхования и сертификации роботизированных комплексов в АПК и т.д.

Тем не менее, запрос на развитие в области цифровизации остаётся высоким и, помимо большого вовлечения в данный процесс промышленных предприятий и владельцев сельскохозяйственных угодий, активно поддерживается на федеральном уровне.

Развитие модели RaaS в российском сельском хозяйстве требует комплексного подхода, сочетающего технологические, регуляторные и образовательные меры. В первую очередь необходимо стимулировать создание отечественных RaaS-платформ – конкурентоспособных решений, адаптированных под специфику АПК России; примером такого потенциала служат разработки вроде семейства роботов AgroMultiBot Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Параллельно требуется сформировать четкую нормативно-правовую базу: закрепить правила использования автономной техники, включая механизмы лицензирования, страхования и распределения ответственности за её действия.

Важную роль должна сыграть государственная поддержка: с учётом текущей динамики целесообразно дополнить меры субсидированием абонентской платы за RaaS для малых хозяйств – это снизит барьер входа и обеспечит равный доступ к технологиям. Одновременно нужно развивать образовательные программы: интегрировать вопросы цифровизации и роботизации в учебные планы аграрных вузов и системы ДПО, чтобы готовить специалистов, способных эффективно эксплуатировать и обслуживать роботизированные системы.

Выводы. 1. Модель RaaS является экономически эффективным инструментом модернизации сельского хозяйства, позволяющим снизить порог капитальных затрат для малых и средних фермерских хозяйств.

2. Расчёты показали, что при стоимости работы беспилотного трактора 3 500 руб./час (или 5 600 руб./га) использование RaaS выгоднее для фермера по сравнению с покупкой или классической арендой техники, особенно на небольших полях, и одновременно приносит прибыль исполнителю услуг.

3. Для успешного развития RaaS в российском АПК необходимо преодолеть технологические, регуляторные и кадровые барьеры, включая развитие отечественных платформ, совершенствование нормативной базы, государственную поддержку (например, субсидирование абонентской платы) и подготовку профильных специалистов.

Библиография

1. Продажи сельскохозяйственной техники в России сократились на 21% // Ведомости: интернет-газета. 2026. 28 января. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2026/01/28/1172202-prodazhi-selskohozyaistvennoi-tehniki-sokratilis> (дата обращения: 27.03.2026).
2. Закарчевский О.В., Сергеев Д.О. Перспективы использования роботизированной сельскохозяйственной техники // АПК: экономика, управление. 2026. № 3. С. 12–19. <https://doi.org/10.33305/263-12>.
3. На прямую поддержку роботизации в АПК РФ в 2026 году выделят 34,4 млрд руб. // ФГБУ «Центр Агроаналитики». 2026. 04 февраля. URL: <https://specagro.ru/news/202602/na-priamuyu-podderzhku-robotizacii-v-apk-rf-v-2026-godu-vydelyat-344-mlrd-rub> (дата обращения: 14.04.2026).
4. Филь О.А. Обоснование технического обеспечения строительства при определении себестоимости работы строительной техники / О. А. Филь // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. 2015. № 37–2. С. 151–154.
5. Овчинникова Е.М. Особенности определения доходов и расходов от предоставления в аренду специализированной техники // Ученые записки Российской академии предпринимательства. 2024. Т. 23. № 4. С. 9–13. <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2024-23-4-9-13>.
6. Дружиловская Т.Ю. Аренда: проблемные аспекты учета и формирования отчетной информации / Т. Ю. Дружиловская, Э. С. Дружиловская // Учет. Анализ. Аудит. 2020. Т. 7, № 2. С. 30–39. DOI 10.26794/2408B9303B2020B7B2B30B39. EDN ZKDMPR.2.
7. Ковтуненко М.Г. Целесообразность применения лизинга в строительстве для малого и среднего бизнеса в Краснодарском крае / М. Г. Ковтуненко, Е. Г. Шойхет, Д. Л. Свиницкий, Н. В. Александров, Е. Д. Зарецких // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 1. URL: <https://esj.today/PDF/10ECVN123.pdf>.
8. Капанова Л.Д. Инвестиции в лизинг: проблемы и перспективы развития лизинга в современной России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2021. Т. 17, № 1. С. 39–66.
9. Аксенов И.А. Проблемы и риски лизинговых операций с субъектами малого предпринимательства / И. А. Аксенов // Индустриальная экономика. 2020. № 3. С. 27–30.
10. Карпова Н.В. Выбор варианта инвестирования в основные средства предприятия строительной отрасли / Н. В. Карпова // Известия Дагестанского ГАУ. 2021. № 1(9). С. 127–136.

References

1. Sales of agricultural machinery in Russia decreased by 21 % // Vedomosti: online newspaper. 2026, January 28. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2026/01/28/1172202-prodazhi-selskohozyaistvennoi-tehniki-sokratilis> (accessed: 27.03.2026).
2. Zakarchevski O.V., Sergeev D.O. Prospects for using robotic agricultural equipment // APK: ekonomika, upravlenie = AIC: economics, management. 2026; (3); 12-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.33305/263-12>.
3. On direct support of robotization in the agro-industrial complex of the Russian Federation in 2026, 34.4 billion rubles will be allocated // FGBU «Center for Agroanalytics». 2026. 04 February. URL: <https://specagro.ru/news/202602/na-priamuyu-podderzhku-robotizacii-v-apk-rf-v-2026-godu-vydelyat-344-mlrd-rub> (accessed: 14.04.2026).
4. Fil O.A. Substantiation of technical support for construction in determining the cost of operation of construction equipment // Modern Trends in Economics and Management: A New Perspective. 2015. № 37–2. P. 151–154.
5. Ovchinnikova E.M. Income and expenses from the rental of specialized equipment // Scientific notes of the Russian academy of entrepreneurship. 2024. T. 23. № 4. P. 9–13. <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2024-23-4-9-13>.
6. Druzhilovskaya T.Yu. Rent: problematic aspects of accounting and formation of accounting information / T. Yu. Druzhilovskaya, E. S. Druzhilovskaya // Accounting. Analysis. Audit. 2020. Vol. 7, № 2. Pp. 30–39. DOI 10.26794/2408B9303B2020B7B2B30B39. EDN ZKDMPR.2.

7. Kovtunenkov M.G., Shoikhet E.G., Svintsitsky D.L., Aleksandrov N.V., Zaretskikh E.D. The feasibility of using leasing in construction for small and medium-sized businesses in the Krasnodar Territory // The Eurasian Scientific Journal. 2023; 15(1): 10ECVN123. Available at: <https://esj.today/PDF/10ECVN123.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Kapranova L.D. Investments in leasing: problems and prospects for leasing development in modern Russia // National Interests: Priorities and Security. 2021. Vol. 17. № 1. P. 39–66.
9. Aksenov I.A. Problems and risks of leasing operations with small business entities // Industrial Economy. 2020. № 3. P. 27–30.
10. Karpova N.V. Selection of investment options for fixed assets of a construction industry enterprise // Proceedings of Dagestan State Agrarian University. 2021. № 1(9). P. 127–136.

Сведения об авторах

Сергеев Данил Олегович, инженер-конструктор, центр транспортных средств и систем, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Россия, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2, 125438, e-mail: danil.sergeev@nami.ru;

Закачевский Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по имущественно-правовым вопросам и вопросам безопасности, ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ, Россия, г. Москва, Хорошевское шоссе, д. 35, корпус 2, 123007, e-mail: zov@vniiesh.ru;

Карякин Сергей Борисович, кандидат технических наук, начальник управления перспективных технологий, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Россия, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2, 125438, e-mail: sergey.karyakin@nami.ru.

Information about authors

Sergeev Danil Olegovich, engineer, Center for Vehicles and Systems, State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI», Moscow, Russia, Avtomotornaya St., 2, 125438, e-mail: danil.sergeev@nami.ru;

Zakarchevsky Oleg Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Property and Legal Affairs and Security Issues, FGBNU FSC VNIIESH, Moscow, Russia, Khoroshevskoye Shosse, 35, Building 2, 123007, e-mail: zov@vniiesh.ru;

Karyakin Sergey Borisovich, Candidate of Technical Sciences and the Head of the Department of Advanced Technologies, State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI», Moscow, Russia, Avtomotornaya St., 2, 125438, e-mail: sergey.karyakin@nami.ru.

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ПРИОРИТЕТНОСТИ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Аннотация. В статье рассматривается проблема выбора приоритетного региона для инвестирования в агропромышленный комплекс в условиях многокритериальности и неопределённости. Обоснована целесообразность применения метода анализа иерархий Т. Саати для интеграции качественных и количественных факторов оценки. Описана процедура реализации метода с использованием системы поддержки принятия решений «Решение», позволяющей структурировать задачу, формализовать экспертные суждения и контролировать их непротиворечивость. Представлена иерархическая модель, включающая целевой уровень, систему критериев и набор альтернативных регионов. По итогам анализа сформировано ранжирование вариантов и обоснован выбор наиболее рационального решения. Доказана практическая эффективность совместного использования МАИ и систем поддержки принятия решений при выработке стратегических решений в агропромышленной сфере.

Ключевые слова: инвестиционный потенциал, агробизнес, метод анализа иерархий, многокритериальный выбор, система поддержки принятия решений, экспертные оценки, согласованность суждений.

EXPERT ASSESSMENT OF INVESTMENT PRIORITIES IN AGRIBUSINESS USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Abstract. The article addresses the problem of selecting a priority region for investment in agribusiness under conditions of multicriterionity and uncertainty. The feasibility of applying Thomas L. Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP) to integrate qualitative and quantitative evaluation factors is substantiated. The implementation procedure of the method is described using the «Solution» decision support system, which allows structuring the problem, formalizing expert judgments, and monitoring their consistency. A hierarchical model is presented, including the goal level, a system of criteria, and a set of alternative regions. Based on the analysis, a ranking of options is formed, and the choice of the most rational solution is justified. The practical effectiveness of combining AHP and decision support systems for strategic decision-making in the agricultural sector is demonstrated.

Keywords: investment potential, agribusiness, Analytic Hierarchy Process, multicriteria selection, decision support system, expert assessments, consistency of judgments.

Современные условия функционирования агропромышленного комплекса (АПК) характеризуются высокой степенью неопределенности. Основными источниками неопределенности выступают климатические риски, колебания рыночной конъюнктуры, сбой в логистических цепочках и частая смена мер государственной поддержки. В такой ситуации инвесторы сталкиваются с необходимостью комплексной оценки территорий при принятии решений о размещении производственных мощностей. Данная оценка требует учета множества разнонаправленных факторов [1].

Традиционные методы финансового анализа опираются преимущественно на количественные показатели. Они оказываются недостаточными для полноценной оценки инвестиционной привлекательности областей, поскольку не учитывают качественные аспекты. Следовательно, возникает потребность в таких подходах, которые позволяют совмещать разнотипные критерии и переводить экспертные оценки в формализованный вид.

Одним из способов решения данной проблемы служит метод анализа иерархий (МАИ) Т. Саати. Логика работы по данному методу строится следующим образом: лицо, принимающее решение (ЛПР), сначала формулирует задачу и выстраивает иерархическую структуру, содержащую цель, систему оценочных критериев и множество альтернативных вариантов. Последующим этапом реализации метода выступает процедура попарного сопоставления элементов построенной иерархии. На финальной стадии обрабатываются результаты, проверяется непротиворечивость экспертных суждений и на основе численных весовых коэффициентов определяется оптимальный вариант. Метод базируется на естественной логике принятия решений, что обеспечивает полноту раскрытия предпочтений ЛПР, а процедуры проверки непротиворечивости напрямую влияют на надежность конечных результатов [8].

Для воплощения рассмотренного подхода на практике в настоящей работе задействована система поддержки принятия решений «Решение». Данное программное обеспечение предоставляет возможность описать проблемную ситуацию, сформировать перечень альтернатив, выделить значимые характеристики, назначить им весовые коэффициенты, выполнить оценивание по всем критериям, зафиксировать несогласованность экспертных мнений, упорядочить альтернативы по степени предпочтительности и провести интерпретацию полученных результатов [9].

Основной задачей, рассматриваемой в настоящей статье, является выбор области, наиболее предпочтительной для вложения инвестиций в агропромышленный комплекс. Первым шагом при решении поставленной проблемы становится построение иерархической структуры, в которую включаются формулировка цели, критерии сравнения потенциальных вариантов и сами варианты, подлежащие дальнейшему выбору (рис. 1).

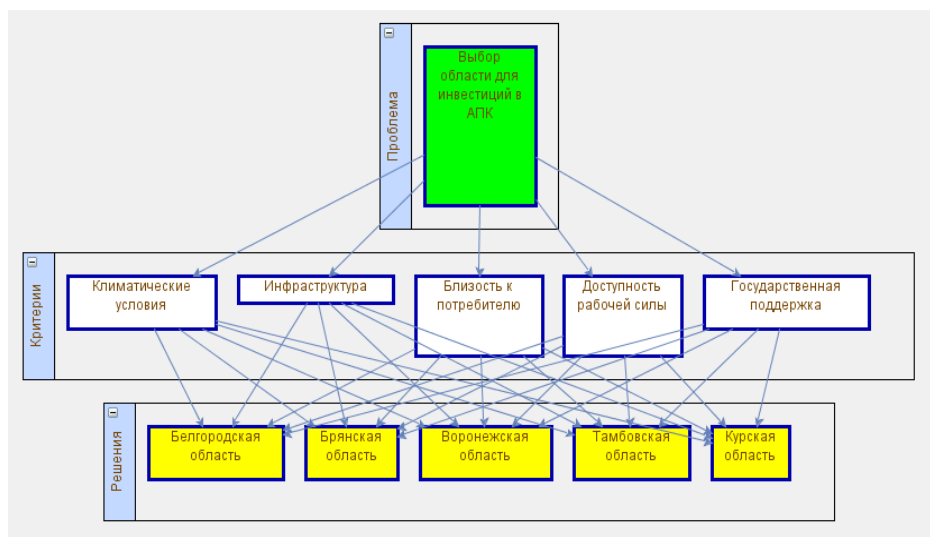


Рис. 1 – Иерархия для оценки выбора областей для инвестирования в АПК

К критериям предъявляется ряд требований: они должны допускать сопоставление по всем рассматриваемым регионам, не пересекаться между собой и не дублировать друг друга. Совокупность параметров формируется по принципу разумной достаточности: охватывать ключевые характеристики альтернатив, оставаясь при этом компактной.

Согласно рисунку 1, отбор наилучшей области для инвестирования ведётся среди 5 конкурирующих вариантов. Сопоставление этих альтернатив опирается на следующий перечень критериев:

- климатические условия;
- инфраструктура;
- близость к потребителю;
- доступность рабочей силы;
- государственная поддержка.

На следующем этапе попарно сопоставляются элементы иерархии, опираясь на суждения ЛПР. Эксперт отвечает на вопросы о важности, предпочтительности или вероятности каждого элемента. Получаемые оценки отражают индивидуальную систему предпочтений ЛПР, складывающуюся из его компетентности, существующих ограничений, а также факторов правового, экономического, социального и психологического характера.

Результаты попарных сравнений критериев сведены в матрицу, приведённую на рисунке 2.

	1.	2.	3.	4.	5.	Приоритеты
1. Климатические условия	1	5	5	3	7	0,476
2. Инфраструктура	1/5	1	1/3	1/5	5	0,079
3. Близость к потребителю	1/5	3	1	1/3	5	0,136
4. Доступность рабочей силы	1/3	5	3	1	7	0,277
5. Государственная поддержка	1/7	1/5	1/5	1/7	1	0,033

C3: 5,424 IC: 0,106 OC: 0,099 F: 0,068

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения.
* При наведении на ячейку выводится рекомендуемая оценка.

Рис. 2 – Сравнение критериев

В приведённом примере максимальный приоритет был присвоен критерию «Климатические условия», минимальный – «Государственной поддержке». Подобное распределение вполне объяснимо: чем важнее критерий, тем выше числовые показатели в его строке матрицы парных сравнений. Заполнение матрицы производится с помощью девятибалльной шкалы: 1 означает равноценность элементов, 3 – незначительное, но ощутимое превосходство, 5 – очевидное превосходство, 7 – существенное доминирование, 9 – очень высокая степень превосходства; чётные баллы (2, 4, 6, 8) используются в промежуточных случаях.

Качество экспертных суждений оценивается через индекс согласованности (ИС), рассчитываемый по формуле:

$$ИС = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}, \quad (1)$$

где λ_{max} – максимальное собственное значение (C3) матрицы парных сравнений, а n – размерность матрицы (в рассматриваемом случае n=7).

Для нахождения $\lambda_{\max}$ суммируются элементы каждого столбца, умножаются на компоненты нормализованного вектора приоритетов и складываются. В данном случае ИС = 0,106.

На основе ИС определяется отношение согласованности (ОС):

$$ОС = (ИС/СИ) * 100\%, \quad (2)$$

В данной задаче ОС = 9,9 %, что находится в пределах допустимого порога 10 %. Превышение этого порога потребовало бы корректировки экспертных оценок.

На следующем этапе по каждому критерию составлены матрицы попарных сравнений альтернатив. Рисунки 3–7 последовательно отражают результаты сопоставления регионов по параметрам: «Климатические условия», «Инфраструктура», «Близость к потребителю», «Доступность рабочей силы» и «Государственная поддержка».

	1.	2.	3.	4.	5.	Приоритеты
1. Белгородская область	1	5	1	2	2	0,310
2. Брянская область	1/5	1	1/5	1/3	1/3	0,058
3. Воронежская область	1	5	1	2	2	0,310
4. Тамбовская область	1/2	3	1/2	1	1	0,161
5. Курская область	1/2	3	1/2	1	1	0,161

СЗ: 5,004 ИС: 0,001 ОС: 0,001 F: 0,002

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения.
* При наведении на ячейку выводится рекомендуемая оценка.

Исследовать

OK Cancel Корректировка

Рис. 3 – Сравнение решений по критерию «Климатические условия»

	1.	2.	3.	4.	5.	Приоритеты
1. Белгородская область	1	3	1/2	2	2	0,241
2. Брянская область	1/3	1	1/5	1/2	1/2	0,074
3. Воронежская область	2	5	1	3	3	0,414
4. Тамбовская область	1/2	2	1/3	1	1	0,135
5. Курская область	1/2	2	1/3	1	1	0,135

СЗ: 5,019 ИС: 0,005 ОС: 0,004 F: 0,005

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения.
* При наведении на ячейку выводится рекомендуемая оценка.

Исследовать

OK Cancel Корректировка

Рис. 4 – Сравнение решений по критерию «Инфраструктура»

	1.	2.	3.	4.	5.	Приоритеты
1. Белгородская область	1	2	1/2	1/2	1	0,158
2. Брянская область	1/2	1	1/3	1/3	1/2	0,089
3. Воронежская область	2	3	1	1	2	0,298
4. Тамбовская область	2	3	1	1	2	0,298
5. Курская область	1	2	1/2	1/2	1	0,158

СЗ: 5,011 ИС: 0,003 ОС: 0,003 F: 0,005

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения.
* При наведении на ячейку выводится рекомендуемая оценка.

Исследовать

OK Cancel Корректировка

Рис. 5 – Сравнение решений по критерию «Близость к потребителю»

Экспертные оценки, полученные в ходе попарного сравнения, проверяются на согласованность. Отклонения могут быть вызваны ошибками эксперта, некорректными формулировками или недостатком информации. Допустимым считается показатель не выше 0,1. При этом выявить конкретные вопросы, породившие несогласованность, невозможно.

	1.	2.	3.	4.	5.	Приоритеты
1. Белгородская область	1	2	1/3	2	2	0,209
2. Брянская область	1/2	1	1/4	1	1	0,113
3. Воронежская область	3	4	1	3	3	0,438
4. Тамбовская область	1/2	1	1/3	1	1	0,120
5. Курская область	1/2	1	1/3	1	1	0,120

СЗ: 5,073 ИС: 0,018 ОС: 0,017 F: 0,010

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения.
* При наведении на ячейку выводится рекомендуемая оценка.

Исследовать

OK Cancel Корректировка

Рис. 6 – Сравнение решений по критерию «Доступность рабочей силы»

	1.	2.	3.	4.	5.	Приоритеты
1. Белгородская область	1	2	1	2	2	0,282
2. Брянская область	1/2	1	1/2	1	1	0,141
3. Воронежская область	1	2	1	2	3	0,306
4. Тамбовская область	1/2	1	1/2	1	1	0,141
5. Курская область	1/2	1	1/3	1	1	0,130

СЗ: 5,021 ИС: 0,005 ОС: 0,005 F: 0,007

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения.
* При наведении на ячейку выводится рекомендуемая оценка.

Исследовать

OK Cancel Корректировка

Рис. 7 – Сравнение решений по критерию «Государственная поддержка»

По результатам попарного сравнения программа рассчитывает приоритеты каждой альтернативы по каждому критерию, показывая, какой регион лидирует. Так, по критерию «Климатические условия» наивысший приоритет разделяют Белгородская и Воронежская области, а по «Государственной поддержке» лидерство принадлежит Воронежской области.

Ниже приводится итоговый отчёт по решению задачи «Выбор области для инвестиций в агропромышленный комплекс». На рисунке 8 отображены критерии оценки альтернатив, ранжированные по степени их приоритетности.

Критерий	Приоритет
Климатические условия	0.47557592874262505
Инфраструктура	0.07906235606489745
Близость к потребителю	0.13589015813327138
Доступность рабочей силы	0.2766951921364914
Государственная поддержка	0.032776364922714706

Рис. 8 – Приоритетность критериев оценки альтернатив

Согласно рисунку 8, наибольший вес среди всех параметров имеет критерий «Климатические условия» с приоритетом 0,48.

Итоговый рейтинг альтернатив отражён на рисунке 9: каждому региону присвоено числовое значение приоритетности, полученное путём агрегирования оценок по всем установленным критериям.

Решение	Приоритет
Белгородская область	0.25509368160929047
Брянская область	0.08129749980767007
Воронежская область	0.35198938582431094
Тамбовская область	0.16551222073178398
Курская область	0.14610721202694454

Наилучшая альтернатива:

Воронежская область

Рис. 9 – Варианты решения проблемы по приоритетности

Воронежская область набрала наивысший приоритет среди всех рассмотренных регионов – 0,35, что делает её оптимальным выбором для размещения агропромышленного производства.

На рисунке 10 детализированы итоги исследования. Лидерство Воронежской области неоспоримо: её доля в структуре приоритетов (35,2 %) заметно обгоняет суммарные показатели всех прочих участников выборки. Разрыв между первым местом и ближайшим конкурентом весьма существенный.

Белгородская область расположилась на второй строчке с 25,5 %, уступив лидеру более 9 процентных пунктов. Далее следует Тамбовская область с результатом 16,6 %. Остальные регионы заметно отстают: Курская область (14,6 %), а также замыкающая перечень Брянская область (8,1 %).

Таким образом, явное преимущество Воронежской области не оставляет сомнений в её приоритетности, в то время как остальные регионы демонстрируют заметно более низкие количественные оценки.

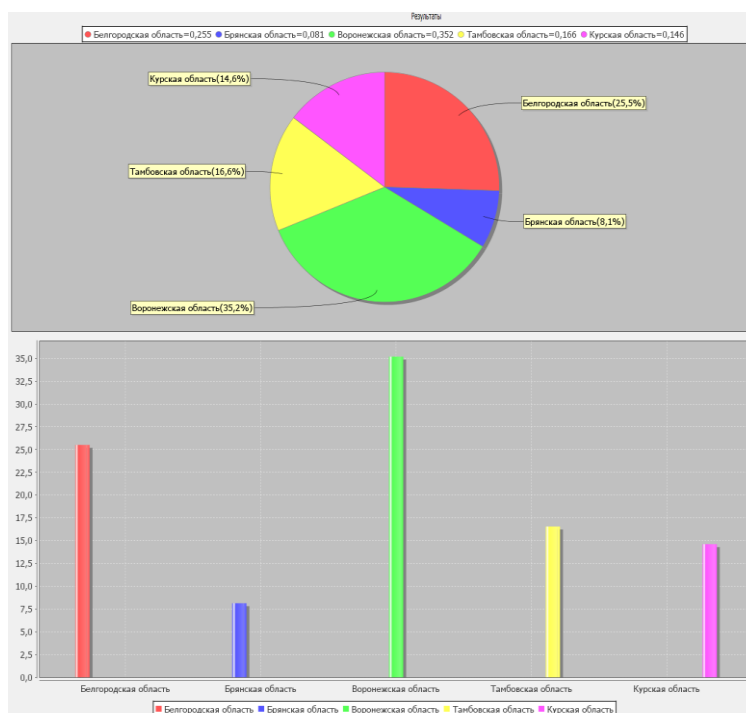


Рис. 10 – Результаты оценки критериев в СППР «Решение»

В настоящей статье рассматривалась задача, относящаяся к классу слабоструктурированных. Их специфика состоит в отсутствии возможности прямого количественного измерения оценочных критериев. Применение системы поддержки принятия решений «Решение», базирующейся на методе анализа иерархий, для решения поставленной проблемы позволило найти оптимальный вариант в условиях неопределённости. В рамках данного исследования наиболее предпочтительной оказалась Воронежская область.

В процессе решения были реализованы следующие этапы: сбор исходных данных, построение иерархической структуры, обработка информации с использованием процедур парного сравнения критериев и альтернатив. На каждом этапе вычислялся индекс согласованности, который служит количественной мерой непротиворечивости экспертных суждений и подтверждает надёжность полученных выводов.

Продemonстрированный подход обладает широким потенциалом применения: любой инвестор, выбирающий площадку для агропромышленного производства, сталкивается с аналогичной многокритериальной задачей. МАИ позволяет декомпозировать сложную проблему, перевести качественные суждения в количественный формат и получить обоснованное ранжирование альтернатив. В рамках настоящего исследования разработанная модель охватывала матрицу сравнения важности критериев, матрицы попарных сравнений по пяти параметрам (климатические условия, инфраструктура, близость к потребителю, доступность рабочей силы, государственная поддержка) и сводную таблицу полезности альтернатив.

Библиография

1. Ленькова Р.К. Моделирование и оптимизация в агропромышленном комплексе. Курс лекций : учебно-методическое пособие / Р. К. Ленькова. Горки : БГСХА, 2019. 64 с.

2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. Москва : Радио и связь, 1993. 278 с.
3. Курбанова Э.Р. Метод анализа иерархий: характеристика / Э. Р. Курбанова // Форум молодых ученых. 2019. № 5(33). С. 749–752.
4. Хоружий Л.И. Оценка инвестиционной привлекательности компаний АПК на основе ESG-факторов / Л. И. Хоружий, Н. А. Трясцин, М. К. Джикия, Н. Ю. Трясцина // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2024. № 2. С. 189–202.
5. Сергеева А.В. Комплексная методика оценки инвестиционной привлекательности предприятий агробизнеса с учетом конкуренции на рынке инвестиционных ресурсов / А. В. Сергеева, Е. А. Мелай, Е. А. Никитина, О. Ю. Смыслова // Экономика, предпринимательство и право. 2025. Т. 15, № 4. С. 2585–2598.
6. Петровский А.Б. Теория принятия решений : учебник для студ. высш. учеб. заведений / А. Б. Петровский. Москва : Издательский центр «Академия», 2009. 400 с. (Университетский учебник. Сер. Прикладная математика и информатика).
7. Расумов В.Ш. Основные проблемы и факторы, влияющие на процесс принятия управленческих решений в агропромышленном комплексе / В. Ш. Расумов, М. Ю. Шадиева, М. В. Чагаева // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 8, № 4(157). С. 36–43.
8. Коваленко Е.Г. Методические подходы и показатели оценки эффективности функционирования регионального АПК / Е. Г. Коваленко, А. А. Коваленко // Управленческий учет. 2025. № 8. С. 204–210.
9. Царева Н.И. Анализ агропромышленного комплекса отдельных регионов ЦФО / Н. И. Царева, А. Г. Справцева // Приоритеты и научное обеспечение реализации государственной политики здорового питания в России : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Орёл, 25 марта – 5 апреля 2024 года. Орёл : Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2024. С. 316–321.

References

1. Lenkova R.K. Modeling and Optimization in the Agro-Industrial Complex. Lecture Course: A Study Guide / R. K. Lenkova. Gorki : Bashkir State Agricultural Academy, 2019. 64 p.
2. Saati T. Decision Making. The Analytic Hierarchy Process Method / T. Saati ; translated from English by R. G. Vachnadze. Moscow : Radio iSvyaz, 1993. 278 p.
3. Kurbanova E.R. The Analytic Hierarchy Process Method: An Overview / E. R. Kurbanova // Forum of Young Scientists. 2019. № 5(33). P. 749–752.
4. Khoruzhy L.I. Assessing the investment attractiveness of agribusiness companies based on ESG factors / L. I. Khoruzhy, N. A. Tryastin, M. K. Dzhikiya, N. Yu. Tryastsina // Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy. 2024. № 2. Pp. 189–202.
5. Sergeeva A.V. Comprehensive methodology for assessing the investment attractiveness of agribusiness enterprises taking into account competition in the investment resources market / A. V. Sergeeva, E. A. Melay, E. A. Nikitina, O. Yu. Smyslova // Economy, entrepreneurship and law. 2025. Vol. 15, № 4. Pp. 2585–2598.
6. Petrovsky A.B. Decision Theory: a textbook for students of higher education institutions. institutions / A. B. Petrovsky. Moscow: Publishing Center «Academy», 2009. 400 p. (University textbook. Series: Applied Mathematics and Computer Science).
7. Rasumov V.Sh. Main problems and factors influencing the process of making management decisions in the agro-industrial complex / V. Sh. Rasumov, M. Yu. Shadieva, M. V. Chagaeva // Economy and management: problems, solutions. 2025. Vol. 8, № 4(157). P. 36–43.
8. Kovalenko E.G. Methodological approaches and indicators for assessing the effectiveness of the functioning of the regional agro-industrial complex / E. G. Kovalenko, A. A. Kovalenko // Management accounting. 2025. № 8. P. 204–210.
9. Tsareva N.I. Analysis of the agro-industrial complex of individual regions of the Central Federal District / N. I. Tsareva, A. G. Spravtseva // Priorities and scientific support for the implementation of the state policy of healthy nutrition in Russia: materials of the VII All-Russian scientific and practical conference with international participation, Orel, March 25 - April 5, 2024. Orel : Oryol State University named after I. S. Turgenev, 2024. P. 316–321.

Сведения об авторах

Сорокина Елена Сергеевна, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий, НИУ «БелГУ», ул. Победы, д. 85, г. Белгород, Белгородская область, 308015, тел. +79103257550, e-mail: elpridvorova@yandex.ru;

Кузьмичева Татьяна Георгиевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий, НИУ «БелГУ», ул. Победы, д. 85, г. Белгород, Белгородская область, 308015, тел. +79511462573, e-mail: kuzmicheva@bsuedu.ru;

Глазунова Олеся Анатольевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры гостинично-туристического сервиса, коммерции и рекламы АНО ВО Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая, д. 116а, г. Белгород, Белгородская область, Россия, 308023, тел. +79103615754, e-mail: inn200479@mail.ru.

Information about authors

Sorokina Elena Sergeevna, Senior Lecturer at the Department of Applied Computer Science and Information Technologies, Belgorod National Research University, 85 Pobedy Street, Belgorod, Belgorod Region, 308015, phone: +79103257550, e-mail: elpridvorova@yandex.ru;

Kuzmicheva Tatyana Georgievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Computer Science and Information Technologies, Belgorod National Research University, 85 Pobedy Street, Belgorod, Belgorod Region, 308015, phone: +79511462573, e-mail: kuzmicheva@bsuedu.ru;

Glazunova Olesya Anatolyevna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Hotel and Tourism Services, Commerce, and Advertising at the Belgorod University of Cooperation, Economics, and Law, 116a Sadovaya Street, Belgorod, Belgorod Region, Russia, 308023, phone: +79103615754, e-mail: inn200479@mail.ru.

Руководство для авторов

В журнале публикуются результаты открытых научных исследований в области сельскохозяйственной науки и техники, материалы о результатах инновационных разработок и проектов предприятий и фирм различных форм собственности, изобретениях; материалы конференций, выставок, конкурсов.

Содержание статей рецензируется (в соответствии с профилем журнала) на предмет актуальности темы, четкости и логичности изложения, научно-практической значимости рассматриваемой проблемы и новизны предлагаемых авторских решений.

Общий объем публикации определяется количеством печатных знаков с пробелами. Рекомендуемый диапазон значений составляет от 12 тыс. до 40 тыс. печатных знаков с пробелами (0,3-1,0 печатного листа). Материалы, объем которых превышает 40 тыс. знаков, могут быть приняты к публикации после предварительного согласования с редакцией. При невозможности размещения таких материалов в рамках одной статьи, они могут публиковаться (с согласия автора) по частям, в каждом последующем (очередном) номере журнала.

Статьи должны быть оформлены на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, кеглем (размером) – 12 пт, для оформления названий таблиц, рисунков, диаграмм, структурных схем и других иллюстраций: Times New Roman, обычный, кегль 10 пт; для примечаний и сносок: Times New Roman, обычный, кегль 10 пт. Для оформления библиографии, сведений об авторах, аннотаций и ключевых слов используется кегль 10 пт, межстрочный интервал – 1,0. Поля сверху и снизу, справа и слева – 2 см, абзац – 1,25 см, формат – книжный. Разделять текст на колонки не следует. Если статья была или будет отправлена в другое издание, необходимо сообщить об этом редакции.

При подготовке материалов не допускается использовать средства автоматизации документов (колонтитулы, автоматически заполняемые формы и поля, даты), которые могут повлиять на изменение форматов данных и исходных значений.

Оформление статьи

Слева в верхнем углу с абзаца печатается УДК статьи (проверяйте корректность выбранного УДК на сайте Всероссийского института научной и технической информации – ВИНТИ либо в сотрудничестве с библиографом учредителя журнала по тел. +7 4722 39-27-05).

Ниже, через пробел, слева с абзаца – инициалы и фамилии автора(ов), полужирным курсивом. Далее, через пробел, по центру строки – название статьи (должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким) жирным шрифтом заглавными буквами.

Затем с красной строки приводится аннотация, оформленная в соответствии с требованиями, предъявляемыми к рефератам и аннотациям ГОСТ 7.9-95, ГОСТ 7.5-98, ГОСТ Р 7.0.4-2006, объемом 200-250 слов (не более 2000 знаков), с нового абзаца – ключевые слова.

Далее необходимо разместить на английском языке: название статьи, аннотацию (Abstract), ключевые слова (Keywords).

После этого через пробел – текст статьи, библиография (библиографическое описание приводится в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка») и ее вариант на английском языке (References). При составлении описаний на английском языке рекомендуется использовать международный стандарт Harvard, с учетом того, что фамилии и инициалы авторов русскоязычных источников, название статьи транслитерируются (согласно правилам Системы Библиотеки Конгресса США – LC), затем в квадратных скобках приводится перевод названия публикации, далее – ее выходные данные (на английском языке либо в транслитерации, без сокращений и аббревиатур).

Далее размещаются сведения об авторах, которые включают фамилию, имя и отчество, ученую степень, ученое звание (при наличии), занимаемую должность или профессию, место работы (учебы) – полное наименование учреждения или организации, включая структурное подразделение (кафедра, факультет, отдел, управление, департамент и пр.), и его полный почтовый адрес, контактную информацию – телефон и(или) адрес электронной почты, а также другие данные по усмотрению автора, которые будут использованы для размещения в статье журнала и на информационном сайте издательства. В коллективных работах (статьях, обзорах, исследованиях) сведения авторов приводятся в принятой ими последовательности. Затем следует англоязычный вариант информации об авторах (Information about authors).

Основной текст публикуемого материала (статьи) приводится на русском или английском языках. Текст публикуемой работы должен содержать введение, основную часть и заключение. Объем каждой из частей определяется автором. Вводная часть служит для обоснования автором цели выбранной темы, актуальности. Затем необходимо подробно изложить суть проблемы, провести анализ, обосновать выбранное решение, отразить, а также привести достаточные основания и доказательства, подтверждающие их достоверность. В заключительной части автор формулирует обобщенные выводы, основные рекомендации или предложения; прогнозы и (или) перспективы, возможности и области их использования. Для выделения наиболее важных понятий, выводов допускается полужирный шрифт и курсив. Не допускается применять подчеркивание основного текста, ссылок и примечаний, а также выделение его (окраска, затенение, подсветка) цветным маркером.

Авторский текст может сопровождаться монохромными рисунками, таблицами, схемами, фотографиями, графиками, диаграммами и другими наглядными объектами. В этом случае в тексте приводятся соответствующие ссылки на иллюстрации. Подписи к рисункам и заголовки таблиц обязательны.

Иллюстрации в виде схем, диаграмм, графиков, фотографий и иных (кроме таблиц) изображений считаются рисунками. Подпись к рисунку располагается под ним посередине строки. Например: «Рис. 1 – Получение гибридных клеток».

При подготовке таблиц разрешается только книжная ориентация таблицы. Подпись таблицы располагается над ней, по центру. Например: «Таблица 3 – Стандарт породы по живой массе племенных телок».

Иллюстрации, используемые в тексте, дополнительно предоставляются в редакцию в виде отдельных файлов хорошего качества, формата TIFF (с разрешением 300 dpi) или EPS, все шрифты должны быть переведены в кривые. Исключение составляют графики, схемы и диаграммы, выполненные непосредственно в программе Word, в которой предоставляется текстовый файл, или Excel. Их дополнительно предоставлять в виде отдельных файлов не требуется.

Математические формулы следует набирать в формульном редакторе Microsoft Equation или Microsoft MathType. Формулы, набранные в других редакторах, а также выполненные в виде рисунков, не принимаются. Все обозначения величин в формулах и таблицах должны быть раскрыты в тексте.

При цитировании или использовании каких-либо положений из других работ даются ссылки на автора и источник, из которого заимствуется материал в виде отсылок, заключенных в квадратные скобки [1]. Все ссылки должны быть сведены

автором в общий список (библиография), оформленный в виде затекстовых библиографических ссылок в конце статьи, где приводится полный перечень использованных источников. Использовать в статьях внутритекстовые и подстрочные библиографические ссылки не допускается.

Порядок представления материалов

Авторы предоставляют в редакцию (ответственным секретарям соответствующих тематических разделов) следующие материалы:

- статью в печатном виде, без рукописных вставок, на одной стороне стандартного листа, подписанную на последнем листе всеми авторами,
- статью в электронном виде, каждая статья должна быть в отдельном файле, в имени файла указывается фамилия первого автора,
- сведения об авторах (в печатном и электронном виде) – анкету автора,
- рецензию на статью, подписанную (доктором наук) и заверенную печатью,
- аспиранты предоставляют справку, подтверждающую место учебы.

При условии выполнения формальных требований к материалам на публикацию предоставленная автором рукопись статьи рецензируется согласно установленному порядку рецензирования рукописей, поступающих в редакцию журнала. Решение о целесообразности публикации после рецензирования принимается главным редактором (заместителями главного редактора), а при необходимости – редколлегией в целом. Автору не принятой к публикации рукописи редколлегия направляет мотивированный отказ.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адреса электронной почты ответственных секретарей тематических разделов приведены ниже.

Тематический раздел «Агроинженерия и энергоэффективность»:

Пастухов Александр Геннадиевич, д. т. н., профессор – ответственный редактор,
Колесников Александр Станиславович, к. т. н., доцент – ответственный секретарь,
e-mail: a.c.kolesnikov@mail.ru
тел. +7 908 783-88-92.

Тематический раздел «Инновационные технологии в агрономии»:

Азаров Владимир Борисович, д. с.-х. н., профессор – ответственный редактор,
Муравьев Александр Александрович, к. с.-х. н., доцент – ответственный секретарь,
e-mail: Aleksandr16_1988@mail.ru
тел. +7 951 142-75-77.

Тематический раздел «Инновационная экономика, управление предприятиями АПК и социальное развитие села»:

Наседкина Татьяна Ивановна, д. э. н., доцент – ответственный редактор,
Демешева Ирина Алексеевна, к. э. н., доцент – ответственный секретарь,
e-mail: demesheva_ia@belgau.ru
тел. +7 920 208-73-49.

Пример оформления статьи

УДК 633.11(470.325)

В.В. Смирнова, Н.А. Сидельникова, И.В. Кулишова

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Текст аннотации Текст аннотации Текст аннотации Текст аннотации Текст аннотации Текст аннотации
Текст аннотации Текст аннотации Текст аннотации (не менее 250 слов, 2000 знаков).

Ключевые слова: ключевые слова, ключевые слова, ключевые слова, ключевые слова, ключевые слова, ключевые слова (не менее 5)

FORMATION OF TECHNOLOGICAL QUALITIES OF GRAIN OF THE WINTER WHEAT IN THE BELGOROD REGION

Abstract. Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation
Text annotation Text annotation.

Keywords: keywords, keywords, keywords, keywords, keywords.

Далее излагается текст научной статьи.....
(текст).....
(текст).....
(текст).....

Таблица 1 – Урожайность зерна сортов озимой пшеницы, т/га (2016-2017 г.г.)

Библиография

Приводится список использованных литературных и других источников на русском

References

и на английском языках.

Сведения об авторах

Смирнова Виктория Викторовна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул.Вавилова, д.1, п.Майский, Белгородский район, Белгородская область, Россия, 308503, тел.+74722 39-14-26, e-mail: svic.belgorod@mail.ru

Сидельникова Наталья Анатольевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул.Вавилова, д.1, п.Майский, Белгородский район, Белгородская область, Россия, 308503, тел.+74722 39-14-26

Кулишова Ирина Владимировна, аспирант второго года обучения кафедры земледелия, агрохимии и экологии, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д.1, п. Майский, Белгородский район, Белгородская область, Россия, 308503.

Information about authors

Smirnova Victoria Viktorovna, candidate of agricultural sciences, associate professor of the production technology and processing of agricultural production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V.Gorin» , ul.Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, , tel. +74722 39-14-26, e-mail: svic.belgorod@mail.ru

Sidelnikova Natalya Anatolyevna, candidate of agricultural sciences, associate professor, head of the department of the production technology and processing of agricultural production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V.Gorin» , ul.Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, , tel. +74722 39-14-26

Kulishova Irina Vladimirovna, graduate student of the second year of training of department of agriculture, agrochemistry and ecology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V.Gorin» , ul.Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia.

Guidelines for authors

Results of open scientific researches in the field of agricultural science and equipment, materials about results of innovative development and projects of the enterprises and firms of various forms of ownership, inventions, materials of conferences, exhibitions and competitions are published in the Journal.

The contents of articles are reviewed (according to Journal's content) for topic relevance, clearness and statement logicity, the scientific and practical importance of the considered problem and novelty of the proposed author's solutions.

The total amount of the publication is decided by the amount of typographical units with interspaces. The recommended range of values makes from 12 thousand to 40 thousand typographical units with interspaces (0,3-1,0 printed pages). Materials which volume exceeds 40 thousand typographical units may be also accepted to the publication after preliminary agreement with editorial body. In case of impossibility of such materials replacement within one article, they may be published (with the author consent) in parts, in each subsequent (next) issue of the Journal.

Articles must be issued on sheets A4, printed type must be Times New Roman, size must be 9 pt, a line spacing is 1,0. Edges above and below, right and left are 2 cm, the paragraph is 0,7 cm (without interspaces), a format is a book. If article was or will be sent to another edition it is necessary to report to our editions.

During materials preparation you may not to use an automation equipment of documents (headlines, automatically filled forms and fields, dates) which can influence change of formats of data and reference values.

Article registration

In the left top corner from the paragraph article UDC is printed (check a correctness of the chosen UDC on the site of the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information or in cooperation with the bibliographer of the founder of Journal by tel. +7 4722 39-27-05).

Below, after interspaces, at the left from the paragraph are full name of the author(s), semi boldface italics. Further, after interspaces, in the center of a line is article title (the name of article has to reflect the main idea of the executed research and should be as short as possible) and it prints with capital letters.

Then with a new paragraph one places a summary (issued according to requirements imposed to papers and summaries of GOST 7.9-95, GOST 7.5-98, GOST P 7.0.4-2006 of 200-250 words (no more than 2000 signs), from the new paragraph one provides keywords.

Further it is necessary to place in English: article title, summary (Abstract), keywords.

Next after interspaces is the text of article, the bibliography (the bibliographic description is provided according to GOST P 7.0.5-2008 "Bibliographic reference") and its option in English (References). By drawing up descriptions in English it is recommended to use the international Harvard standard taking into account that authors full name of Russian-speaking sources, article titles are transliterated (according to rules of System of Library of the Congress of the USA – LC), after that in square brackets is translation of publication title, further is given its output data (in English or transliteration, without reductions and abbreviations).

Further there are data about authors, which include a surname, a name and a middle name; academic degree, academic status (now); post or profession; a place of work (study) – full name of organization, including structural division (chair, faculty, department, management, department, etc.), and their full postal address, contact information – telephone and (or) the e-mail address, and also other data on the author's discretion which will be used for article's replacement in the Journal and on the informational website of publishing house. In collective works (articles, reviews, researches) of data of authors are brought in the sequence accepted by them. Further information about authors in English.

The main text of the published material (article) is provided in Russian or English. The text of the published work has to contain: introduction, main part and conclusion. The volume of each of parts is defined by the author. Then it is necessary to detail a problem, carry out the analysis, prove the chosen decision, and give the sufficient bases and proofs confirming ones reliability. In conclusion the author formulates the generalized conclusions, the main recommendations or offers; forecasts and(or) prospects, opportunities and their application area.

For highlighting of the most important concepts, conclusions is used the bold-face type and italics. It is not allowed to apply underlining of the main text, references and notes, and also its allocation (coloring, illumination) a color marker.

The author's text can be accompanied by monochrome drawings, tables, schemes, photos, schedules, charts and other graphic objects. In this case the corresponding references to illustrations are given in the text. Drawings titles and headings of tables are obligatory.

Illustrations in the form of schemes, charts, schedules, photos and others (except tables) images are considered as drawings. Drawing title is under it in the middle of a line. For example: "Fig. 1 – Obtaining hybrid cells".

During tables preparation you can use only book orientation of the table. Table title is over it, in the center. For example: "Table 3 – The breed standard in live weight of breeding heifers".

The illustrations used in the text in addition are provided in edition in the form of separate files of high quality, the TIFF format (with the resolution of 300 dpi) or EPS, all fonts have to be transferred to curves. The exception is made by the schedules, schemes and charts executed directly in the Word program in which the text file or Excel is provided. It is not required to provide them in the form of different files.

Mathematical formulas should be written in the formular Microsoft Equation or Microsoft MathType editor. The formulas, which are written in other editors and in the form of drawings, are not accepted. All designations of sizes in formulas and tables must be explained in the text.

In case of citing or using any provisions from other works one should give references to the author and a source from which material in the form of the sending concluded in square brackets [1]. All references must be listed by the author in the general list (bibliography) issued in the form of endnote bibliographic references in the end of article where the full list of the used sources is provided. Do not use intra text and interlinear bibliographic references in articles.

Order of materials representation

Authors provide the following materials in edition (responsible secretaries of the appropriate thematic sections):

- article in printed form, without hand-written inserts, on one party of a standard sheet, signed on the last sheet by all authors,
- article in electronic form, each article has to be in the different file, the surname of the original author titles the file,
- data about authors (in a printing and electronic versions) – the questionnaire of the author,

- the review of article signed (doctor of science) and certified by the press
- graduate students provide the reference confirming a study place.

On condition of implementation of formal requirements to materials for the publication the article manuscript provided by the author is reviewed according to an established order of reviewing of the manuscripts, which are coming to editorial office of the Journal. The decision on expediency of the publication after reviewing is made by the editor-in-chief (deputy chief editors), and if it is necessary by an editorial board in general. The editorial board sent to the author of the unaccepted manuscript a motivated refusal.

The payment for the manuscripts publication is not charged from graduate students.

E-mail addresses of responsible secretaries of thematic sections are given below:

Thematic section “**Agricultural Engineering and Energy Efficiency**”:

Pastukhov Alexander Gennadievich, Dr. of Tech. Sci., Professor – the editor-in-chief,

Kolesnikov Alexander Stanislavovich, Cand. Tech. Sci., the Associate professor – the responsible secretary,

e-mail: a.c.kolesnikov@mail.ru

Tel. +7 908 783-88-92.

Thematic section “**Innovative Technologies in Agronomy**”:

Azarov Vladimir Borisovich., Dr. Agric. Sci., Professor – the editor-in-chief,

Muravyov Alexander Alexandrovich, Cand. Agri. Sci., the Associate professor – the responsible secretary,

e-mail: Aleksandr16_1988@mail.ru

Tel. +7 952 142-75-77.

Thematic section “**Innovative Economics, Management of Agricultural Enterprises and Social Development of the Village**”:

Nasedkina Tatyana Ivanovna, Dr. Econ. Sci., the Associate professor – the editor-in-chief,

Demesheva Irina Alekseevna, Cand. Econ. Sci., the Associate professor – the responsible secretary,

e-mail: demesheva_ia@belgau.ru

Tel. +7 920 208-73-49.

Example of registration of article

UDC 633.11(470.325)

V.V. Smirnova, N.A. Sidelnikova, I.V. Kulishova

**FORMATION OF TECHNOLOGICAL QUALITIES OF GRAIN
OF THE WINTER WHEAT IN THE BELGOROD REGION**

Abstract. Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation Text annotation
Text annotation Text annotation (not less than 250 words).

Keywords: keywords, keywords, keywords, keywords, keywords (not less than 5 keywords).

Text.....
.....
.....

Table 1 – The breed standard in live weight of breeding sows

References

1. Smirnova V.V. Vliyanie predshestvennikov na urozhajnost' sortov ozimoy pshenicy, tekhnologicheskie kachestva zerna i ih izmenenie pri hranenii: avtoreferat dis. ... kand.s.-h. nauk: 06.01.09 / Smirnova V.V.; BelGSKHA. – Belgorod, 2007. – 19 s.
2. Sidel'nikova N.A. Sovershenstvovanie intensivnyh tekhnologij vozdeleyvaniya zernovyh kul'tur v CCHZ / N.A. Sidel'nikova, L.G. Gavrilenko // Sbornik nauchnyh trudov SKHI.-Belgorod, 1988.-111s.
3. GOST R 52554 – 2006. Pshenica. Tekhnicheskie usloviya. – Vved. 2007-07-01. – M.: Standartinform, 2006. – 13 s.

Information about authors

Smirnova Victoria Viktorovna, candidate of agricultural sciences, associate professor of the production technology and processing of agricultural production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, , tel. +74722 39-14-26, e-mail: svic.belgorod@mail.ru

Sidelnikova Natalya Anatolyevna, candidate of agricultural sciences, associate professor, head of the department of the production technology and processing of agricultural production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, , tel. +74722 39-14-26

Kulishova Irina Vladimirovna, graduate student of the second year of training of department of agriculture, agrochemistry and ecology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia.