ISSN 2311-9535

Инновации в АПК:
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ



№3 (51) 2026

Инновации в АПК: проблемы и перспективы

Теоретический и научно-практический журнал

Выпуск 3 (51)
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;
Китаёв Ю.А., д.э.н., доцент;
Котлярова Е.Г., д.с.-х.н., профессор;
Коцарева Н.В., д.с.-х.н., доцент;
Купреенко А.И., д.т.н., профессор;
Лебедев А.Т., д.т.н., профессор;
Ломазов В.А., д.физ.-мат.н., профессор;
Меделяева З.П., д.э.н., профессор;
Морозова Т.С., к.с.-х.н., доцент;
Моторин В.А., д.т.н., доцент;
Муравьёв 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 следующие научные специальности, представленные в журнале:

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

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

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного 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».

Сайт журнала на веб-портале «Национальная платформа периодических научных изданий»: https://journals.rcsi.science/2311-9535

Отпечатано в ООО Издательско-полиграфический центр «ПОЛИТЕРРА»
Подписано в печать 01.10.2026 г., дата выхода в свет 15.10.2026 г.
Усл. п.л. 10. Тираж 1000 экз. Заказ № 2140. 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 3 (51)
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

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin», 2026

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

The journal's website on the RCSI Journals Platform:
https://journals.rcsi.science/2311-9535

Printed in (Limited liability company) Publication and printing center «POLYTERRA»
Signed for publication 01.10.2026, date of publication 15.10.2026.
Conventional printed sheet 10. Circulation 1000 copies.
Order № 2140. Free price.
Adress 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

СОДЕРЖАНИЕ

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

А.С. Горлов, Г.Н. Аверьянов, С.В. Рябцева, Е.И. Красюкова
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА.....5

В.А. Моторин, Д.С. Гапич, И.Б. Борисенко, Д.В. Скрипкин, О.А. Денисова, Ю.С. Кошенсков
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИАМЕТРА ДИСКОВОГО НОЖА ДЛЯ МЕЖДУРЯДНОГО ПОДРЕЗАНИЯ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ.....11

Е.Н. Неверов, П.С. Руднев, А.Л. Майтаков
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ КАМЕРЫ В ОБЪЁМЕ КУРИНЫХ ЯИЦ В ПРОЦЕССЕ ИНКУБАЦИИ.....20

А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев
АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ ШАРНИРОВ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ.....30

А.М. Попов, Г.Б. Узунов, К.Б. Плотников, И.Б. Плотников, А.С. Бузаков
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЯГОДНЫХ СОКОВ ПРИ ОМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ В ПРОЦЕССЕ ИХ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ.....36

Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев, Н.А. Березина, Н.С. Чернышов
ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПРИ КАРБОВИБРОДУГОВОМ УПРОЧНЕНИИ.....43

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОНОМИИ

А.В. Бурлуцкий, В.Б. Азаров, Н.И. Клостер
ГУМУСОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЁМА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ В БИОЛОГИЧЕСКОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ ЦЧР.....50

Е.А. Кудрявцева, В.Б. Азаров
ДИНАМИКА НОДУЛЯЦИИ СОИ КАК ИНДИКАТОР ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ.....54

А.В. Лодыгин, В.Б. Азаров
ВЛИЯНИЕ СТИМУЛЯТОРОВ КОРНЕОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФИТОГОРМОНОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВСХОЖЕСТИ КАРТОФЕЛЯ.....57

Е.Д. Фалин, В.Б. Азаров
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЧЕТАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ В РЕГУЛИРОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕРНОЗЁМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО НА ПОСЕВАХ СОИ.....60

Я. Янь, И.В. Чичерин, Л. Чжао, Т. Си, Ч. Ан
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СБОРА ЧАЯ.....63

ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯМИ АПК И СОЦИАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ СЕЛА

Т.И. Наседкина, А.И. Черных, И.А. Демешева
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ.....70

Руководство для авторов.....79

CONTENTS

AGRICULTURAL ENGINEERING AND ENERGY EFFICIENCY

A.S. Gorlov, G.N. Averyanov, S.V. Ryabtseva, E.I. Krasyukova
MATHEMATICAL MODELING OF AERODYNAMIC PROCESSES OF A CONVEYOR-TYPE DRYING UNIT....5

V.A. Motorin, D.S. Gapich, I.B. Borisenko, D.V. Skripkin, O.A. Denisova, Yu.S. Koshenskov
THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE DISC BLADE DIAMETER FOR INTER-ROW ROOT SYSTEM UNDERCUTTING.....11

E.N. Neverov, P.S. Rudnev, A.L. Maitakov
DEVELOPMENT OF A COMPUTER VISION SYSTEM FOR ASSESSING THE AIR CELL POSITION IN CHICKEN EGGS DURING INCUBATION.....20

A.G. Pastukhov, D.N. Bakharev
ANALYTICAL EVALUATION OF RADIAL CLEARANCE IN BEARING UNITS OF JOINTS OF CARDAN GEARS.....30

A.M. Popov, G.B. Uzunov, K.B. Plotnikov, I.B. Plotnikov, A.S. Buzakov
STUDY OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF BERRY JUICES UNDER OHMIC HEATING DURING CONCENTRATION.....36

N.V. Titov, A.V. Kolomeichenko, V.N. Logachev, N.A. Berezina, N.S. Chernyshov
JUSTIFICATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF STABLE COMBUSTION OF AN ELECTRIC ARC DURING CARBO-VIBRO-ARC HARDENING.....43

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN AGRONOMY

A.V. Burlutskiy, V.B. Azarov, N.I. Kloster
HUMUS STATE OF CHERNOZEM WHEN USING ORGANIC FERTILIZERS IN THE BIOLOGICAL AGRICULTURE OF THE CDR.....50

E.A. Kudryavtseva, V.B. Azarov
SOYBEAN NODULATION DYNAMICS AS AN INDICATOR OF FERTILIZER SYSTEM EFFECTIVENESS IN THE CENTRAL CHERNOZEM REGION.....54

A.V. Lodigin, V.B. Azarov
THE EFFECT OF ROOT FORMATION STIMULANTS BASED ON PHYTOHORMONES TO INCREASE POTATO GERMINATION.....57

E.D. Falin, V.B. Azarov
ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF COMBINING ORGANIC FERTILIZERS AND CHEMICAL AMELIORATION IN REGULATING THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF LEACHED CHERNOZEM UNDER SOYBEAN CROPS.....60

Y. Yang, I.V. Chicherin, L. Zhao, T. Xi, Ch. An
ANALYTICAL REVIEW OF ROBOTIC SYSTEMS FOR TEA HARVESTING.....63

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

T.I. Nasedkina, A.I. Chernykh, I.A. Demesheva
IMPROVING THE FORMATION OF ACCOUNTING (FINANCIAL) REPORTING AND WAYS TO INCREASE FINANCIAL RESULTS.....70

Guidelines for authors.....79

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

УДК 66.047.4/5

А.С. Горлов, Г.Н. Аверьянов, С.В. Рябцева, Е.И. Красюкова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА

Аннотация. Современное сельское хозяйство предъявляет высокие требования к качеству обработки и хранения зерновых культур. Одним из ключевых этапов в этой цепочке является сушка, от которой зависит не только сохранность урожая, но и его коммерческая ценность. Особое внимание к этому процессу вызвано разнообразием сельскохозяйственных культур, каждая из которых обладает уникальными свойствами, влияющими на показатели термической устойчивости и влагосодержания. При организации процессов сушки зерновых культур необходимо учитывать биологические особенности формирования, роста и созревание зерна. Температурный режим сушки оказывает большое влияние на изменения формы, объема зерна и на течение биологических процессов внутри зерна. Процессы испарения (удаления) влаги из зерна у разных культур протекают по-разному. Разными являются скорость удаления влаги, площадь или объем, откуда происходит испарение. При больших скоростях испарения может произойти разрушение целостности зерна. При высоких температурах сушки могут проходить негативные биологические процессы в зерне, ухудшающие всхожесть или другие характеристики зерна. Статья посвящена исследованию аэродинамического процесса и температурного режима сушки зерновых культур, в частности гороха в сушильных установках с конвейерной лентой. Основное внимание уделяется математической модели и методике расчета аэродинамических параметров. Рассмотрена математическая модель, основанная на правилах Кирхгофа, для оценки потока газа и сопротивления на различных участках сушилки. Получены аналитические выражения для вычисления потоков теплоносителя и приведены результаты численных расчётов скоростей. Разработанная модель предоставляет возможность управления аэродинамическими характеристиками процессов конвективной сушки в сушильных установках конвейерного типа, что может значительно улучшить эффективность процесса сушки и снизить затраты на энергоресурсы.

Ключевые слова: аэродинамика сушильных аппаратов, конвейерная сушилка, сушка гороха, дисперсионные материалы, численное моделирование.

MATHEMATICAL MODELING OF AERODYNAMIC PROCESSES OF A CONVEYOR-TYPE DRYING UNIT

Abstract. Modern agriculture places high demands on the quality of grain processing and storage. Drying is a key stage in this chain, determining not only the safety of the harvest but also its commercial value. Particular attention to this process is required due to the diversity of agricultural crops, each with unique properties that influence thermal stability and moisture content. When organizing grain drying processes, it is necessary to consider the biological characteristics of grain formation, growth, and maturation. Drying temperatures significantly influence changes in grain shape and volume, as well as the biological processes occurring within the grain. The process of evaporation (removal) of moisture from grain varies among crops. The rate of moisture removal and the area or volumes from which evaporation occurs vary. High evaporation rates can damage the integrity of the grain. High drying temperatures can also trigger negative biological processes in the grain, impairing germination or other grain characteristics. This article examines the aerodynamic process and temperature regime for drying grain crops, specifically peas, in conveyor belt dryers. The focus is on the model and calculation methodology for aerodynamic and heat and mass transfer processes. The article includes a mathematical model based on Kirchhoff's rules for estimating gas flow and resistance in various sections of the dryer. Formulas for calculating coolant flows are derived, and the results of numerical velocity calculations are presented. The developed model enables control of the aerodynamic characteristics of drying processes in conveyor-type dryers, which can significantly improve drying efficiency and reduce energy costs.

Keywords: drying apparatus aerodynamics, conveyor dryer, pea drying, dispersed materials, numerical modeling.

Введение. Одной из основных задач Государственной программы развития сельского хозяйства и ее структурных элементов, определенными в соответствии с национальными целями развития Российской Федерации, определенными Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», является увеличение объемов производства продукции по пищевым продуктам. Немаловажную роль в этом процессе играет процесс сушки зерновых культур.

Организация процесса и температурного режима сушки зерновых культур зависит, в первую очередь, от вида сельхозкультур, от дальнейшего хранения и их использования. Зерна различных культур существенно отличаются в плане термической устойчивости. Они могут иметь различную химическую и биологическую составляющую. Влага в зерне накапливается в процессе роста, в процессе формирования зерновой культуры, поступая в зерно через ограниченную область (как правило область зародыша).

При выборе методов сушки необходимо учитывать ряд факторов, определяющих дальнейшее использование зернового материала: семейный фонд, кормовые добавки для животных, пищевые компоненты для продуктов питания. Для разного предназначения нужен свой температурный режим сушки и его соблюдение [1]. Необходимо при сушке учитывать то, что происходит деформация зерна из-за удаления влаги и других компонент внутреннего строения зерна и его оболочки [2, 3]. Необходимо соблюдать скорость продвижения конвейерных лент, на которых размещается слой зерна [4]. Поэтому одной из основных задач является выбор конструкций сушильных установок, а также организация эффективных аэродина-

© Горлов А. С., Аверьянов Г. Н., Рябцева С. В., Красюкова Е. И., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

мических режимов работы сушилок, обеспечивающих оптимальное протекание процесса сушки. При конвективной сушке важным является аэродинамика процесса движения теплого воздуха (теплоносителя) в сушилке и через слой материала [5].

Вопросы газодинамики (гидродинамики) в засыпках или неподвижных слоях дисперсных материалов рассматриваются, например, в работах [6-8]. Сопротивления дисперсных слоёв при прохождении через них газа рассматриваются в работах [9-11]. Вопросы теплопередачи при продувке слоёв дисперсных материалов рассматриваются в работах [7, 10, 12]. Описание процессов сушки зерновых культур рассматривается в работах [13-15].

Объект и методы исследования. В сушильных установках с движущимся конвейером (конвейерной лентой) с дисперсным материалом, нагретые газы с начальной температурой (порядка 50 °С) продуваются вентилятором (дымососом) через слой материала (гороха) (рис. 1). Прохождение нагретого газа через слой гороха в сушильной камере приводит к его нагреву, обеспечивая его обезвоживание и нагрев элементов всей конструкции сушильной установки [16].

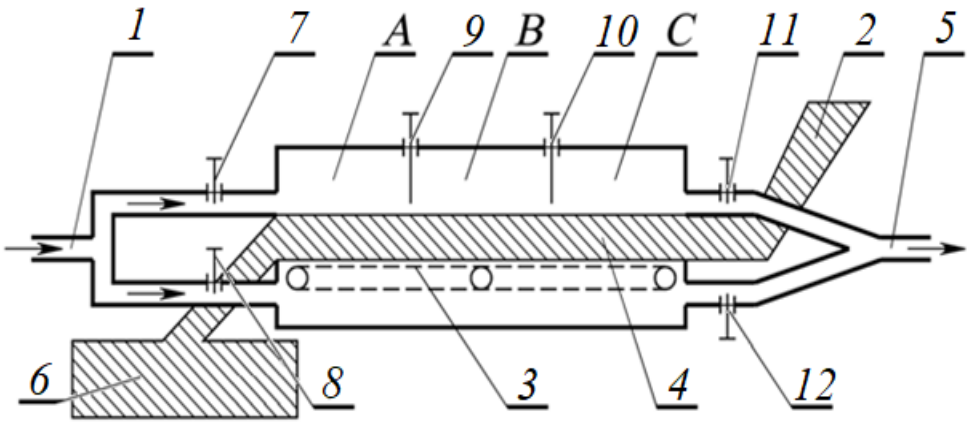


Рис. 1 – Схема сушильной установки

Принцип работы конвейерной сушилки (рис. 1) основан на конвективной сушке подогретым воздухом. Материал (горох) загружается в бункер 2, откуда подаётся на движущуюся конвейерную ленту 3, с помощью которой непрерывно перемещается через зоны нагрева *A*, *B*, *C*, где обдувается горячим воздухом, который отбирает влагу, после чего выгружается 6. Горячий воздух подаётся по воздуховоду 1 после чего разбивается на два потока, которые можно регулировать заслонками 7, 8. Верхней поток проходит через секции сушилки *A*, *B*, *C*. Часть нагретого воздуха проходит через слой материала 4 (гороха) в нижнюю часть сушилки, на что влияют положения заслонок 9 и 10 между секциям, а так же заслонок 11 и 12 в верхней и нижней зонах сушилки соответственно. Аналогично часть нижнего потока может через слой материала просачиваться в верхнюю зону сушилки. Затем верхний и нижний потоки теплоносителя покидает сушилку через воздухоотвод 5.

Для обеспечения оптимизации процессов в сушильных установках с движущейся конвейерной лентой необходима разработка математической модели и методики расчета аэродинамических, тепло- и массообменных процессов в них.

В сушильной установке не допускается прохождение всего нагретого газа через слой гороха, часть его может проходить через зазор в соседнюю камеру. Изменением зазоров между слоем гороха и межкамерными перегородками и частичным перекрытием шиберными заслонками отводящих трубопроводов можно регулировать потоки газа так, чтобы обеспечить компромисс между теплообменом в системе газ-горох, нагревом элементов конструкции ленты установки и температурой отходящих газов.

В настоящей работе приводится математическая модель и разработанная методика расчета аэродинамики сушильной установки для гороха.

Основные результаты исследований. Система уравнений аэродинамики для установки составлена на основании теории расчета сложных систем с использованием правил Кирхгофа. Исходя из схемы потоков в сушильной установке, расчетная сеть аэродинамики принимается в виде, приведенном на рисунке 2.

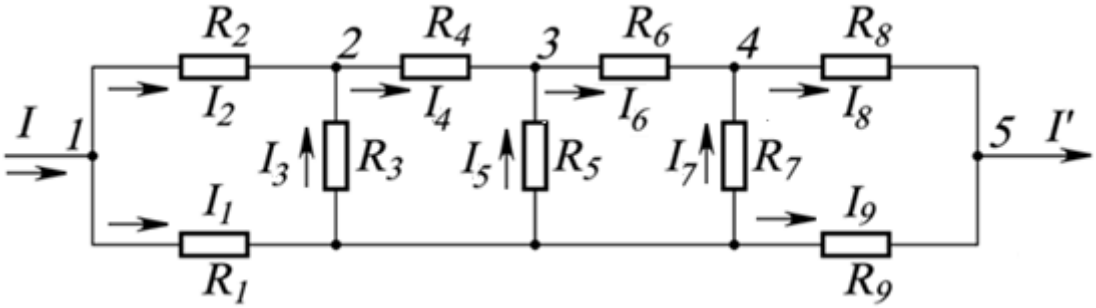


Рис. 2 – Схема для расчета аэродинамики сушильной установки

Составим модель сушильной установки следующим образом: условно разобьем сушилку на 4 контура: вход, переход между 1-ой и 2-ой секцией сушилки, переход между 2-ой и 3-ей секциями сушилки, выход. На этих контурах отметим следующие участки: 1, 2 – входные заслонки (нижняя и верхняя); 3, 5, 7 – слой материала (гороха) в первой, второй и третьей камерах сушилки; 4, 6 – заслонки между секциями сушилки; 8, 9 – заслонки на выходе (верхняя и нижняя).

Обозначим через R_K – гидравлические сопротивления при перетекании теплоносителя через соответствующие участки установки; I_K – потоки теплоносителя, при прохождении соответствующих участков; $I,\ I'$ – потоки теплоносителя при входе и выходе из сушильной установки, кг/с.

Для составления уравнений, описывающих аэродинамику потоков газа в указанной схеме сушильной установки, применим правила Кирхгофа [17, 18]. Согласно первому правилу Кирхгофа, справедливым будет тождество:

$$\sum_{K=1}^{M} I_K = 0, \tag{1}$$

где M – общее число входящих и исходящих потоков в узле, при этом, если поток входит в узел, то перед ним ставится знак плюс, а если исходит из узла – знак минус.

Расписав первое правило Кирхгофа (1) в узлах 1–5 схемы (рис. 2), получим первую систему (2):

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2; \\ I_2 + I_3 = I_4; \\ I_4 + I_5 = I_6; \\ I_6 + I_7 = I_8; \\ I_8 + I_9 = I'. \end{cases} \tag{2}$$

Второе правило Кирхгофа будет иметь вид:

$$\sum_{K=1}^{N} I_K R_K = 0, \tag{3}$$

где N – число участков в контуре, при этом, если направление потока I_K совпадает с выбранным направлением, то ставится знак плюс, в противном случае – знак минус.

Применив второе правило Кирхгофа (3) к четырём контурам схемы (рис. 2), получим вторую систему (4):

$$\begin{cases} I_2 R_2 = I_1 R_1 + I_3 R_3; \\ I_3 R_3 + I_4 R_4 = I_5 R_5; \\ I_5 R_5 + I_6 R_6 = I_7 R_7; \\ I_7 R_7 + I_8 R_8 = I_9 R_9. \end{cases} \tag{4}$$

В качестве сопротивления R_K рассматривается перепад давления газа на соответствующем участке [6, 12].

Опишем гидравлические сопротивления отдельных участков и полное сопротивление сушильной установки. Можно выделить два вида сопротивлений: гидравлические сопротивления пористых слоев (таким слоем является слой горошин на решетке сушилки), а также гидравлические сопротивления задвижек (такими задвижками являются разделительные стенки в пространстве сушильной камеры и шиберы).

Слой гороха на ленте транспортёра представляет собой в гидродинамическом и тепловом отношении засыпку или неподвижный слой, образованный частицами монодисперсного состава.

Основными геометрическими параметрами слоя шарообразных частиц являются: ε – порозность (пористость), т.е. доля пространства, не заполненного твердым компонентом; D – диаметр частиц, м; H – полная высота слоя, м.

При протекании нагретого газового потока через слой дисперсного материала существует три основных режима течения: молекулярный, ламинарный и турбулентный.

В рассматриваемой задаче реализуется, как правило, турбулентный режим течения в пористой среде.

В работе рассматривается сыпучая, несвязная среда, к таким средам относится порошки, различные кусковые материалы, засыпки из элементов правильной геометрической формы – шаров, цилиндров.

Коэффициент сопротивления дисперсного сыпучего слоя зернистых тел постоянного диаметра D и толщины слоя H можно вычислить по формуле [3]:

$$\xi = \Delta p \Big/ \frac{\rho w^2}{2} = \frac{1{,}53}{\varepsilon^{4{,}2}}\left(\frac{30}{Re} + \frac{3}{Re^{0{,}7}} + 0{,}3\right)\frac{H}{D} = k\lambda'\frac{H}{D} = \lambda\frac{H}{D}, \tag{5}$$

где Δp – разность давлений на рассматриваемом участке, ρ – насыпная плотность гороха, кг/м^3; w – скорость потока газа на рассматриваемом участке аэродинамической схемы, м/с; λ – коэффициент сопротивления слоя толщиной в один диаметр зерна, $k = 1{,}53/\varepsilon^{4{,}2}$, $\lambda' = \frac{30}{Re} + \frac{3}{Re^{0{,}7}} + 0{,}3$, Re – число Рейнольдса, которое можно вычислить по формуле [9]:

$$Re = \frac{0{,}45}{(1-\varepsilon)\sqrt{\varepsilon}} \cdot \frac{wD}{\nu}, \tag{6}$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости газа.

Коэффициент живого сечения слоя, состоящего из одинаковых сферических тел, не зависит от диаметра зерна; они являются функциями взаимного расположения зерен, т.е. угла θ, образованного центрами соседних шаров, $45° < \theta < 60°$ [9], тогда пористость равна:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1-\cos\theta)\sqrt{1+2\cos\theta}}. \tag{7}$$

Если прохождение газа через слой материала сопровождается охлаждением или нагреванием его, то коэффициент сопротивления равен:

$$\xi_t = \Delta p \Big/ \frac{\rho w_{cp}^2}{2} = \xi + \Delta\xi_t. \tag{8}$$

Величина $\Delta\xi_t$ определяется по формуле:

$$\Delta\xi_t = 2\frac{T_{вых} - T_{вх}}{T_{ср}}, \tag{9}$$

где $T_{вых}$, $T_{вх}$ – температуры газа на выходе и входе в слой материала соответственно, ℃):

$$\begin{gathered} T_{ср} = \frac{T_{вых} + T_{вх}}{2}, \\ w_{ср} = w\frac{T_{ср}}{T_{вх}}, \\ \rho_{ср} = \rho_0\frac{273}{T_{ср}}, \end{gathered} \tag{10}$$

при кубической упаковке сфер высота слоя $H = nD$, где n – число слоев шаров между плоскопараллельными, проницаемыми для газа стенками [9]. При этом пористость, согласно (7), принимает значение $\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6}$.

При октаэдрической упаковке сфер высота слоя $H = D\left(1 + \frac{n-1}{\sqrt{2}}\right)$, пористость $\varepsilon = 1 - \frac{\pi n}{3\sqrt{2}(\sqrt{2}+n-1)}$ [3].

Коэффициент сопротивления в зазорах межкамерных перегородок и в шиберных заслонках рассчитывается по формуле Борда [12]:

$$\xi = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2 \delta} - 1\right)^2, \tag{11}$$

где ω_1 – площадь поперечного сечения камеры до и после задвижки, м^2; ω_2 – площадь поперечного сечения отверстия, м^2; δ – коэффициент сжатия.

В приведенных формулах системы (4) гидравлические сопротивления R_K – это перепад давления на соответствующем участке цепи, Па:

$$R_K = b_K w_k^2 = \Delta p_K, \tag{12}$$

где b_K – коэффициент сопротивления рассматриваемого участка.

Согласно (5), коэффициент гидравлического сопротивления $\xi_K = \Delta p / \frac{\rho_K w_K^2}{2}$, откуда перепад давлений $\Delta p_K = \xi_K \frac{\rho_K w_K^2}{2}$, тогда с учётом формулы (12) имеем $b_K = \frac{\xi_K \rho_k}{2}$.

В качестве потока (токов) I_K рассматривается поток газа на соответствующем участке. Потоки можно представить в виде:

$$I_K = c_K w_K, \tag{13}$$

где $c_K = \rho_K S_K$ – произведение плотности газа ρ_K на рассматриваемом участке, на площадь поперечного сечения S_K этого участка.

Обозначим $d_K = \rho_K S_K b_K = c_K b_K$, тогда системы (2) и (4) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} I = c_1 w_1 + c_2 w_2; \\ c_2 w_2 + c_3 w_3 = c_4 w_4; \\ c_4 w_4 + c_5 w_5 = c_6 w_6; \\ c_6 w_6 + c_7 w_7 = c_8 w_8; \\ c_8 w_8 + c_9 w_9 = I'; \end{cases} \qquad \begin{cases} d_2 w_2^3 = d_1 w_1^3 + d_3 w_3^3; \\ d_3 w_3^3 + d_4 w_4^3 = d_5 w_5^3; \\ d_5 w_5^3 + d_6 w_6^3 = d_7 w_7^3; \\ d_7 w_7^3 + d_8 w_8^3 = d_9 w_9^3. \end{cases} \tag{14}$$

Последовательно выражая скорости w_K из системы (14), получим

$$\begin{cases} w_2 = \dfrac{I - c_1 w_1}{c_2}; \\ w_4 = \dfrac{c_2 w_2 + c_3 w_3}{c_4}; \\ w_6 = \dfrac{c_4 w_4 + c_5 w_5}{c_6}; \\ w_8 = \dfrac{c_6 w_6 + c_7 w_7}{c_8}; \\ I' = c_8 w_8 + c_9 w_9; \end{cases} \qquad \begin{cases} w_3 = \sqrt[3]{\dfrac{d_2 w_2^3 - d_1 w_1^3}{d_3}}; \\ w_5 = \sqrt[3]{\dfrac{d_3 w_3^3 + d_4 w_4^3}{d_5}}; \\ w_7 = \sqrt[3]{\dfrac{d_5 w_5^3 + d_6 w_6^3}{d_7}}; \\ w_9 = \sqrt[3]{\dfrac{d_7 w_7^3 + d_8 w_8^3}{d_9}}; \end{cases} \tag{15}$$

Для решения систем (15) использовался следующий численный метод. Считая заданным значение потока I, подбираем значение скорости w_1 так, чтобы при последовательном вычислении значений $w_2, w_3, \dots, w_9$, по формулам (14), величина исходящего потока I' совпадала с входящим I.

Для расчёта использовались следующие значения:

- слой гороха на транспортере сушилки, $H = 0{,}35$ м;
- размеры транспортера сушилки, 3×20 м;
- площадь сечения трубы нижнего трубопровода, $S_{1,9} = 1{,}12$ *м*^{2};
- суммарная площадь сечения труб верхнего трубопровода, $S_{2,8} = 0{,}8$ *м*^{2};
- высота зазора между слоем гороха и между камерными шиберами, $H = 0{,}4$ м;
- величина входящего потока воздуха I =8…10 кг/с.

Для реализации численного метода решения системы (15) написана программа, позволяющая получать значения скоростей воздуха(газа) на участках при разных значениях конструктивных и технологических параметров сушильной установки. Результаты работы программы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения скоростей газа на участках при различных значениях входящего потока, м/с

I, кг/с	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
8	1,21	3,50	0,24	0,50	-0,06	1,31	-0,66	67,67	33,54
9	1,36	3,94	0,27	0,56	-0,07	1,48	-0,74	76,21	37,78
10	1,51	4,37	0,30	0,62	-0,08	1,64	-0,82	84,68	41,98

Значением скоростей и их распределением в сушильной установке можно управлять с помощью шиберных заслонок 7 и 8, а также с помощью межкамерных заслонок 9 и 10, изменяя площадь прохождения теплоносителя.

Значения скоростей теплоносителя на участках сушильной камеры не должны превышать значений, при которых может происходить фонтанирование частиц в слое гороха или отрыв частиц и унос их из сушильной установки. На участках конвейерной ленты наблюдаются зоны с отрицательными значениями скоростей теплоносителя, это говорит о том, что су-

ществуют области с обратными течениями теплоносителя. Использование полученной модели позволит осуществлять управление этими потоками.

Выводы. На основании представленных выше результатов можно сделать следующие выводы.

1.Разработана математическая модель аэродинамики сушильной установки для гороха, которая позволяет проводить оценку влияния различных конструктивных мероприятий на аэродинамику, формировать нужную структуру потоков в сушильной установке обеспечивающую или максимальную теплопередачу материалу, или наиболее благоприятный тепловой режим работы для элементов конструкции установки.

2.Математическая модель, программа расчета аэродинамики сушильной установки для гороха и полученные численные результаты дают возможность получить достаточно полное представление об аэродинамике сушилки и позволяют проанализировать возможности управления теплотехнологическими процессами, а также внесение изменений в конструктивные элементы сушильной установки.

3.В дальнейшем полученная математическая модель будет проверена натурными испытаниями на экспериментальной сушильной установке конвейерного типа при разных аэродинамических режимах.

Библиография

1. Прибытков А.В., Овсянников В.Ю., Мартеха А.Н., Торопцев В.В. Основные факторы, влияющие на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 5. С. 33–35. EDN: UIZSZH.

2. Окунев А.В. Современные методы вакуумной и микроволновой сушки зерна и семян // Российский электронный журнал. 2021. № 1(39). С. 51–59. DOI: 10.31563/2308-9644-2021-39-1-51-59.

3. Бабичев Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И. Псевдоожижение семян проса и гороха // Агроинженерия. 2021. № 5(105). С. 13–19. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19.

4. Шевцов С.А., Остриков А.Н. Техника и технология сушки пищевого растительного сырья. Воронеж : ВГУИТ, 2014. 289 с.

5. Малахов Н.Н., Горбачев Н.Б., Меркушев С.И., Галаган Т.В. Математическая модель конвективной сушки овощей // Известия вузов. Пищевая технология. 2002. № 6. С. 58–60.

6. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. М. : Химия. 1979. 176 с.

7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука. 1987. 840 с.

8. Гидравлика, гидромашины и гидропривод / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов [и др.]. М. : Машиностроение. 1982. 424 с.

9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., пер. и доп. М. : Машиностроение. 1992. 672 с.

10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат. 1990. 367 с.

11. Шевчов А.А., Дранников А.В., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. Резервы энергоэффективности конвективной сушки дисперсных материалов при переменных режимах // Вестник ВГУИТ. 2017. № 2. С. 17.

12. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. М. : Стройиздат. 1987. 415 с.

13. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М. : Химия. 1988. 352 с.

14. Богомолов И.С., Клейменова Н.Л., Копылов М.В., Исследование процесса сушки зерновых культур // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 14–19. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002. EDN: FOQYNS.

15. Курманов А.К., Камышева Н.А. Частная методика по исследованию процесса разрушения зерна гороха // BI: Intellect, Idea, Innovation-Интеллект, идея, инновация. 2018. № 4. С. 76–81. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19. EDN: NCNPZI.

16. Нестеров А.В. Промышленная сушка. Санкт-Петербург : Лань. 2021. 304 с.

17. Горлов А.С., Аверьянов Г.Н., Переверзев Н.П., Горлов К.А. Моделирование процессов течения теплоносителя в сушилках с неподвижным слоем дисперсных материалов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 1(45). С. 25–30.

18. Горлов А.С., Аверьянов Г.Н., Бахарев Д.Н. Моделирование движения нагретого газа-теплоносителя в неподвижном слое материала // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 3(47). С. 12–17.

References

1. Pribytkov A.V., Ovsyannikov V.Yu., Martekha A.N., Toroptsev V.V. Osnovnyye faktory, vliyayushchiye na kinetiku protsessa sushki fermentirovannogo pshenichnogo syr'ya [The main factors influencing the kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials] // Khraneniye i pererabotka sel'khozsyr'ya. 2015. № 5. S. 33–35. EDN: UIZSZH.

2. Okunev A.V. Sovremennyye metody vakuumnoy i mikrovolnovoy sushki zerna i semyan [Modern methods of vacuum and microwave drying of grain and seeds] // Rossiyskiy elektronnyy zhurnal. 2021. № 1(39). S. 51–59. DOI: 10.31563/2308-9644-2021-39-1-51-59.

3. Babichev Ye.L., Rudobashta S.P., Sidel'nikov I.I. Psevdoozhizheniye semyan prosa i gorokha [Fluidization of millet and pea seeds] // Agroinzheneriya.2021. № 5(105). S. 13–19. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19.

4. Shevtsov S.A., Ostrikov A.N. Tekhnika i tekhnologiya sushki pishchevogo rastitel'nogo syr'ya [Equipment and technology for drying]. Voronezh : VGUIT, 2014. 289 s.

5. Malakhov N.N., Gorbachev N.B., Merkushev S.I., Galagan T.V. Matematicheskaya model' konvektivnoy sushki ovoshchey [Mathematical model of convective drying of vegetables] // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya 2002. № 6. S. 58–60.

6. Aerov M.E., Todes O.M., Narinsky D.A. Apparaty so statsionarnym zernistym sloyem. Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty [Stationary Granular Layer Apparatus. Hydraulic and Thermal Principles of Operation]. M. : Khimiya. 1979. 176 s.

7. Loitsyansky L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and Gas Mechanics]. M. : Nauka. 1987. 840 s.

8. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. [et al.] Gidravlika, gidromashiny i gidroprivod [Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drive]. M. : Mashinostroyeniye. 1982. 424 s.

9. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of Hydraulic Resistance] / Pod red. M.O. Shteynberga. 3-ye izd., per. i dop. M. : Mashinostroyeniye. 1992. 672 s.

10. Kutateladze S.S. Teploperedacha i gidrodinamicheskoye soprotivleniye [Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance]. M. : Energoatomizdat. 1990. 367 s.

11. Shevchov A.A., Drannikov A.V., Tkach V.V., Serdyukova N.A. Rezervy energoeffektivnosti konvektivnoy sushki dispersnykh materialov pri peremennykh rezhimakh [Energy efficiency reserves of convective drying of dispersed materials under variable conditions] // Vestnik VGUIT. 2017. № 2. S. 17.

12. Altshul A.D., Zhivotovsky L.S., Ivanov L.P. Gidravlika i aerodinamika [Hydraulics and aerodynamics]. M. : Stroyizdat. 1987. 415 s.

13. Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. Sushka dispersnykh materialov [Drying of Dispersed Materials]. M. : Khimiya. 1988. 352 s.

14. Bogomolov I.S., Kleymenova N.L., Kopylov M.V. Issledovaniye protsessa sushki zernovykh kul'tur [Study of the drying process of grain crops] // Polzunovskiy vestnik. 2021. № 4. S. 14–19. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002. EDN: FOQYNS.

15. Kurmanov A.K., Kamysheva N.A. Chastnaya metodika po issledovaniyu protsessa razrusheniya zerna gorokha [Private methodology for studying the process of pea grain destruction] // BI: Intellect, Idea, Innovation-Intellekt, ideya, innovatsiya. 2018. № 4. S. 76–81. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19. EDN: NCNPZI.

16. Nesterov A.V. Promyshlennaya sushka [Industrial Drying]. Sankt Peterburg : Lan'. 2021. 304 s.

17. Gorlov A.S., Averyanov G.N., Pereverzev N.P., Gorlov K.A. Modelirovaniye protsessov techeniya teplonositelya v sushilkakh s nepodvizhnym sloyem dispersnykh materialov [Modeling of Coolant Flow Processes in Dryers with a Fixed Bed of Dispersed Materials] // Innovatsii v APK: problemy i perspektivy. 2025. № 1(45). S. 25–30.

18. Gorlov A.S., Averyanov G.N., Bakharev D.N. Modelirovaniye dvizheniya nagretogo gaza-teplonositelya v nepodvizhnom sloye materiala [Modeling of Heated Coolant Gas Movement in a Fixed Bed of Material] // Innovatsii v APK: problemy i perspektivy. 2025. № 3(47). S. 12–17.

Сведения об авторах

Горлов Александр Семенович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики, ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, Белгородская область, Россия, 308012, тел. +7 (9205) 54-91-89, e-mail: belgoras@mail.ru;

Аверьянов Георгий Николаевич, старший преподаватель кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, Белгородская область, Россия, 308012, тел. +7 (9192) 23-11-36, e-mail: averyanovgn@gmail.com;

Рябцева Светлана Васильевна, старший преподаватель кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, Белгородская область, Россия, 308012;

Красюкова Елена Игоревна, старший преподаватель кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, Белгородская область, Россия, 308012.

Information about authors

Gorlov Aleksandr Semenovich, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of higher mathematics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov», ul. Kostyukova, 46, Belgorod, Belgorod region, Russia, 308012, tel. +7 (9205) 54-91-89, e-mail: belgoras@mail.ru;

Averyanov Georgy Nikolaevich, senior lecturer of the department of higher mathematics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov», ul. Kostyukova, 46, Belgorod, Belgorod region, Russia, 308012, tel. +7 (9192) 23-11-36, e-mail: averyanovgn@gmail.com;

Ryabtseva Svetlana Vasilievna, senior lecturer of the department of higher mathematics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov», ul. Kostyukova, 46, Belgorod, Belgorod region, Russia, 308012;

Krasyukova Elena Igorevna, senior lecturer of the department of higher mathematics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov», ul. Kostyukova, 46, Belgorod, Belgorod region, Russia, 308012.

УДК 631.316.4

В.А. Моторин, Д.С. Гапич, И.Б. Борисенко, Д.В. Скрипкин, О.А. Денисова, Ю.С. Кошенсков

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИАМЕТРА ДИСКОВОГО НОЖА ДЛЯ МЕЖДУРЯДНОГО ПОДРЕЗАНИЯ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. В условиях реализации Доктрины продовольственной безопасности РФ ключевой задачей является повышение урожайности картофеля при снижении химической нагрузки на агроценозы. Традиционные методы интенсификации практически исчерпали свой ресурс. Базовой причиной исследования является необходимость снижения химического и гербицидного воздействия на агробиоценоз за счет внедрения альтернативных механических методов ухода. Перспективным экологическим приемом интенсификации картофелеводства и хлопководства выступает направленное механическое воздействие на растения путем контролируемого подрезания боковых корней, что активизирует отток питательных веществ к репродуктивным органам и обеспечивает повышение товарности клубней картофеля, а также ускоренное созревание хлопка. Однако применение стандартных сплошных дисков на своде гребня приводит к осыпанию его откосов и заминанию растительных тканей. Для устранения этих недостатков необходима разработка специализированного дискового ножа оптимального диаметра и теоретическое обоснование характера его силового взаимодействия с почвой. Составлена система уравнений статики и получена аналитическая зависимость тягового усилия. Установлено, что полное тяговое сопротивление диска состоит из трех слагаемых: усилий на преодоление бокового трения, на резание лезвием со скольжением и на резание без скольжения. Доказано, что увеличение радиуса диска при фиксированной глубине обработки снижает общее тяговое сопротивление почвы за счет роста длины участка лезвия, работающего в режиме скользящего резания. На основе силового анализа обоснован оптимальный постоянный диаметр дискового ножа, равный 510 миллиметрам. Безразмерное отношение глубины погружения к радиусу h/r=0,59 обеспечивает режим резания корней со скольжением.

Ключевые слова: картофелеводство, дисковый нож, уравнения статики, тяговое сопротивление, резание со скольжением, перфорация тела диска.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE DISC BLADE DIAMETER FOR INTER-ROW ROOT SYSTEM UNDERCUTTING

Abstract. Under the implementation of the Food Security Doctrine of the Russian Federation, the key task is to increase potato yields while reducing the chemical load on agroecosystems. Traditional intensification methods have practically exhausted their resource. The fundamental reason for this study is the need to reduce chemical and herbicide impacts on the agrobiocenosis through the introduction of alternative mechanical maintenance methods. A promising ecological technique for the intensification of potato and cotton cultivation is directed mechanical impact on plants via controlled undercutting of lateral roots. This process activates the translocation of nutrients to reproductive organs, ensuring an increase in the marketability of potato tubers as well as accelerated ripening of cotton. However, the use of standard solid discs on the ridge crest leads to the slumping of its slopes and the blunt crushing of plant tissues. To eliminate these disadvantages, it is necessary to develop a specialized disc knife of an optimal diameter and provide a theoretical justification for its force interaction with the soil. A system of static equations was compiled, and an analytical dependence of the draft resistance was obtained. It was established that the total traction resistance of the disc consists of three components: forces to overcome side friction, blade cutting with sliding, and cutting without sliding. It is proven that increasing the disc radius at a fixed tillage depth reduces the total draft resistance of the soil due to the increased length of the blade section operating in the sliding cut mode. Based on the force analysis, an optimal constant disc knife diameter of 510 millimeters was justified. The dimensionless ratio of the immersion depth to the radius h/r=0.59 ensures the root cutting mode with sliding.

Keywords: potato growing, disc knife, static equations, traction resistance, sliding cutting, perforation of the disc body.

Введение. Обеспечение населения качественным семенным и продовольственным картофелем в засушливых условиях Нижнего Поволжья напрямую зависит от внедрения ресурсосберегающих технологий ухода за посадками [1-3]. Главной экологической и экономической проблемой современного картофелеводства региона является высокая гербицидная нагрузка, ведущая к токсикации светло-каштановых почв и ухудшению качества продукции. Базовой причиной проведения данного исследования является необходимость снижения химического воздействия на агробиоценоз за счет внедрения альтернативных механических методов ухода [4-6].

Одним из перспективных экологизированных приемов интенсификации выступает направленное механическое стрессирование растений путем контролируемого подрезания боковых корней [7-10]. Этот прием перестраивает биоэнергетический баланс картофеля, активизирует отток питательных веществ к репродуктивным органам, стимулирует клубнеобразование и обеспечивает повышение товарности клубней до 87,5 %. Однако реализация метода сдерживается отсутствием адаптивных технических средств, так как применение стандартных сплошных дисков на своде гребня приводит к лавинообразному осыпанию его откосов и лобовому заминанию растительных тканей. В связи с этим возникает необходимость разработки специализированного дискового ножа увеличенного диаметра.

В своих теоретических предположениях мы опирались на фундаментальные труды академика В.П. Горячкина по общей теории навесных орудий и на классические исследования профессора Н.Е. Резника в области теории резания дисковыми рабочими органами. При обосновании параметров учитывались современные наработки волгоградской научной школы картофелеводства под руководством профессора М.Н. Шапрова, подтверждающие необходимость сохранения структуры почвенного монолита в аридных условиях.

Современные тенденции развития картофелеводства базируются на интенсивном применении гребневой технологии возделывания, которая обеспечивает создание оптимального водно-воздушного и температурного режимов в корнеобитае-

© Моторин В. А., Гапич Д. С., Борисенко И. Б., Скрипкин Д. В., Денисова О. А., Кошенсков Ю. С., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

мой зоне почвенного массива [11-13]. Высокая продуктивность культуры может быть достигнута только при условии своевременного и качественного выполнения комплекса мелиоративно-механизированных приемов по уходу за посадками [14-16].

Анализ отечественного и зарубежного опыта механизации междурядной обработки картофеля показывает, что существующий парк машин представлен широким спектром культиваторов, реализующих различные технологические схемы воздействия на почву и сорную растительность (рис. 1–4).



Рис. 1 – Культиватор пропашной КРН-4,2-02



Рис. 2 – Культиватор для междурядной обработки почвы КРН-5,6А



Рис. 3 – Культиватор-окучник навесной КОН-2,8



Рис. 4 – Окучник GRIMME GH 4

Традиционно для формирования и поддержания геометрии гребней в период вегетации применяются пропашные культиваторы общего назначения серии КРН-4,2, КРН-5,6 (рис. 2 и 3), специализированные картофельные культиваторы-окучники типа КОН-2,8 (рис. 4) и их зарубежные аналоги производства компаний *Grimme* серия *GH* (рис. 5) и др.

В зависимости от характера взаимодействия с обрабатываемой средой рабочие органы серийных машин классифицируются на пассивные, активные (ротационные) и комбинированные (см. таблица 1).

К пассивным рабочим органам относятся стрельчатые и долотовидные лапы, закрепленные на жестких или подпружиненных стойках, а также корпуса отвальных окучников (лемешных и дисковых). Основным технологическим назначением лап является подрезание сорняков в междурядьях и рыхление дна борозды [17-20]. Корпуса окучников осуществляют подъем взрыхленной почвы из междурядья и ее направленное перемещение на откосы и вершину гребня для увеличения его объемных параметров.

Таблица 1 – Классификация рабочих органов междурядной обработки

Пассивные органы	Активные органы
(Стрельчатые, долотовидные лапы, отвальные окучники)	(Ротационные фрезы, вертикальные валы)
Высокое лобовое сопротивление Разрушение откосов гребня Эффект сгруживания корней	Интенсивное крошение Распыление структуры Переуплотнение дна

Критический анализ пассивных органов выявляет ряд существенных конструктивно-технологических недостатков при их работе в условиях интенсивного гребневого картофелеводства:

1) жестко закрепленные лапы обладают высоким лобовым сопротивлением, вызывают значительное уплотнение подпахотного горизонта (эффект «плужной подошвы») и приводят к неконтролируемому сколу и осыпанию откосов гребня при нарушении центрирования тракторного агрегата;

2) пассивные лемешные окучники при движении на скоростях свыше 5…6 км/ч осуществляют избыточный отброс почвы, что приводит к засыпанию культурных растений и нарушению однородности профиля гребня.

Альтернативой пассивным орудиям являются фрезерные культиваторы с активными рабочими органами типа *Grimme GF* или *Struik ZF* (рис. 5), снабженные горизонтальным валом с жестко закрепленными Г-образными зубьями. Активные органы обеспечивают высококачественное мелкокомковатое крошение почвы и превосходное формирование геометрии гребня даже на тяжелых и заплывающих глинистых почвах. Однако интенсивное механическое фрезерование имеет серьезные экологические и экономические ограничения. Высокая угловая скорость вращения ротора приводит к распылению почвенной структуры, разрушению водопрочных агрегатов и форсированной потере почвенной влаги. Кроме того, фрезерные агрегаты отличаются чрезвычайно высокой энергоемкостью и низкой производительностью, что увеличивает прямые эксплуатационные затраты.



Рис. 5 – Междурядный культиватор Struik ZF

В зоне стыка междурядного пространства и защитной зоны рядка картофеля особый интерес представляют дисковые окучивающие органы. В отличие от лемешных корпусов, сферические диски за счет качения снижают силу трения о почву, уменьшают общее тяговое сопротивление и практически не забиваются сорной растительностью. Сферические диски устанавливаются под определенными углами атаки и наклона к вертикали, что позволяет регулировать высоту насыпаемого гребня.

Тем не менее, стандартные серийные дисковые органы спроектированы исключительно для перемещения почвенных масс и совершенно не приспособлены для направленного, дозированного агробиологического воздействия на корневую систему культурного растения. При их случайном смещении вглубь гребня гладкая сплошная кромка сферического диска производит неконтролируемое срезание и сгруживание не только периферийных, но и проводящих стержневых корней картофеля, что влечет за собой глубокий физиологический шок растения, увядание ботвы и резкое падение урожайности.

Материал и методы исследований. Для проведения экспериментальных исследований процесса стимулирующего подрезания корневой системы картофеля в условиях гребневой технологии разработан и изготовлен специальный лабораторно-полевой комплекс (экспериментальное орудие). Данное техническое решение спроектировано в виде адаптируемого навесного модуля (секция междурядного культиватора), позволяющего моделировать различные конструктивно-геометрические режимы взаимодействия рабочего органа с почвенным гребнем.

Экспериментальная секция (рис. 6) представляет собой комбинированный рабочий орган, в котором последовательно соединены элементы для механического воздействия на корневую систему и последующего восстановления геометрии почвенного массива гребня. Конструкция секции включает следующие основные узлы: несущую раму 1 с параллелограммным механизмом навески, опорное колесо 2 с винтовым механизмом регулировки глубины хода 3, режущий элемент — перфорированный дисковый нож 4, окучник 5.

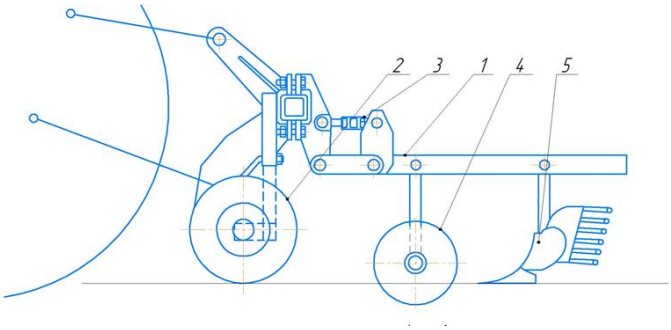


Рис. 6 – Секция почвообрабатывающего орудия для стимулирующего подрезания корневой системы в междурядьях

Для подтверждения теоретических предпосылок и поиска оптимальных параметров разработанного рабочего органа нами реализована программа лабораторно-полевых экспериментальных исследований. Эксперименты проводились в учебно-научно-производственном центре «Горная поляна» на территории города Волгоград. Почвенный покров опытного участка представлен светло-каштановыми почвами со средней влажностью 17,8…19,5 % и твердостью до 1,3 МПа. В качестве объекта исследований выступал процесс механического взаимодействия рабочих органов с корневой системой картофеля в почвенном массиве.

Основным критерием оценки технологического процесса принят агротехнический показатель – коэффициент полноты реза боковых корней картофеля $k_р \geq 95$ % дисковым ножом. Определение этого показателя велось в соответствии с ГОСТ 34360–2017 в зоне свода гребня сразу после прохода экспериментального навесного модуля.

В последние десятилетия в мировом и отечественном агроинженерном сообществе активно развивается направление, связанное с прецизионным управлением продукционным процессом культурных растений посредством дозированных механических воздействий на их подземную архитектонику. Анализ научно-технической и патентной литературы показывает, что идея стимулирующего разобщения (подрезания) части корневой системы нашла отражение в ряде конструкторских разработок, однако большинство из них узкоспециализированы и не адаптированы к жестким условиям гребневой технологии картофелеводства.

Дисковые рабочие органы со сплошной режущей кромкой лишены этих недостатков — они перекатываются по почве, минимизируя силы трения. Однако при движении на наклонных плоскостях и своде гребня гладкий диск начинает про-

скальзывать и переходит в режим «юза». При встрече с упругими корневыми пучками он начинает работать как пассивный скребок – корни не перерезаются, а сгруживаются фронтальной кромкой, что приводит к выдергиванию растений из рядка.

Нами учтены результаты исследований волгоградской научной школы в области проектирования дисковых систем, подтвержденные целым рядом охранных документов, к примеру патентом на изобретение RU 2268574 (рис. 7, а), и другими научными публикациями.

Применение дисков с открытыми периферийными вырезами типа «ромашка» по техническим решениям RU 178145 (рис. 7, б) и SU 1358798 (рис. 7, в) решает проблему буксования, но из-за своей геометрии они действуют как ковши, выбрасывая большие объемы рыхлой почвы со свода гребня в междурядье. Комбинированные агрегаты по решению RU 2399179 имеют значительный продольный разнос органов, из-за чего идущий сзади окучник не способен качественно восстановить структуру уже подсохшего и деформированного пласта.

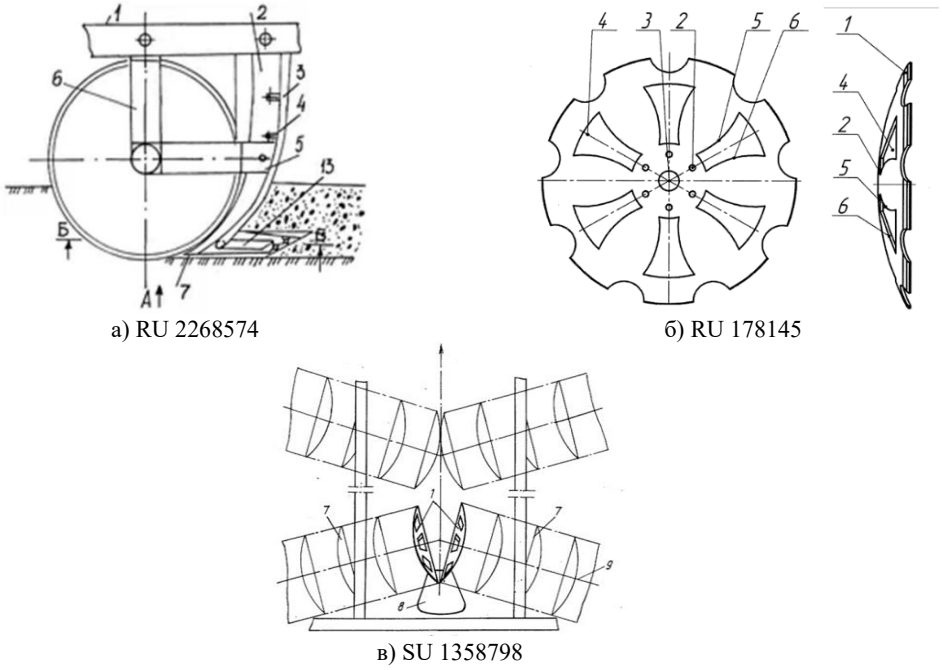


Рис. 7 – Секция почвообрабатывающего орудия для стимулирующего подрезания корневой системы в междурядьях картофеля

Проведенный патентно-литературный обзор выявил серьезный научно-технический пробел: в сельскохозяйственном машиностроении отсутствуют рабочие органы, способные контролируемо и бережно подрезать корни в гребне, гарантируя при этом сохранение его геометрии в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52778–2007.

Результаты исследований. Одним из перспективных, но недостаточно изученных направлений является технология стимулирующего механического воздействия на корневую систему картофеля (рис. 8). Согласно биологическим исследованиям, целенаправленное и дозированное повреждение периферийных боковых корней провоцирует переход растения от наращивания вегетативной массы к ускоренному оттоку питательных веществ в клубни. Данный прием позволяет не только увеличить общую массу урожая, но и повысить его товарность за счет выравнивания фракционного состава клубней, что критически важно для промышленной переработки [11].

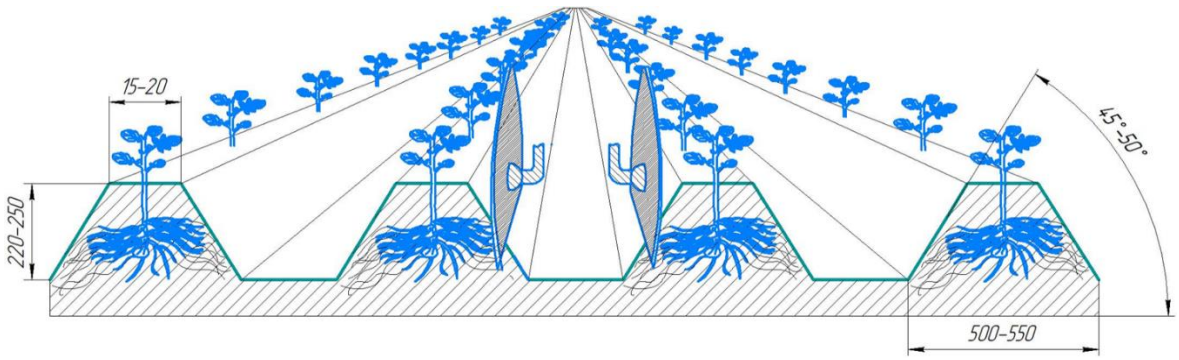


Рис. 8 – Графическое представление технологического процесса механического воздействия на корневую систему картофеля

Резание почвы дисковым ножом можно представить как вращение колеса, имеющего очень тонкий обод, по деформирующейся поверхности с образованием колеи. Движение точек колеса можно представить как вращение его вокруг мгновенного центра вращения.

Расчет тягового усилия дискового ножа будем проводить в предположении однородности почвы на всей глубине резания, что упрощает расчет и достаточно правильно отображает процесс резания.

При резании почвы дисковым ножом на последний будет действовать реактивное сопротивление, состоящее из сопротивления почвы разрушению лезвием диска и силы трения на боковых поверхностях. Вместе с этим имеется сила трения в подшипниках дискового ножа, которую в наших расчетах мы опустим по ее малости при наличии соответствующего ухода за подшипниками.

Погруженная часть диска в почву является симметричной относительно вертикальной оси, отсюда следует, что результирующая элементарных сил трения T будет направлена горизонтально. Величина силы трения зависит от нормального давления на боковые поверхности и может быть определена по формуле

$$T = 2fqs, \quad (1)$$

где q – нормальное давление почвы на боковую поверхность диска, кг/см^2; s – площадь погруженной части дискового ножа в почву, см^2; f – коэффициент трения почвы о сталь.

Величина q может быть определена при помощи плотномера при горизонтальном вдавливании, снабженного штампом. Глубина погружения штампа должна равняться половине толщины дискового ножа.

Величина силы Q, которая удерживает диск в почве, должна быть равна сумме проекций реактивных сопротивлений на лезвие диска на вертикальную ось.

Исходя из изложенного, можно составить систему уравнений статики для качения дискового ножа со скольжением в следующем виде:

$$\Sigma X = -P + T + r\,p_1 \int_{\Omega 2}^{\Omega 3} \sin\Omega\, d\,\Omega + r\,p_2 \int_{\Omega 1}^{\Omega 2} \sin\Omega\, d\,\Omega +$$
$$+ r\,p_1 \int_0^{\Omega 1} \sin\Omega\, d\Omega - f_1\, r\,p_1 \int_{\Omega 2}^{\Omega 3} \cos\Omega\, d\,\Omega + f_1\, r\,p_1 \int_0^{\Omega 1} \cos\Omega\, d\Omega = 0, \quad (2)$$

$$\Sigma Y = -Q + r\,p_1 \int_{\Omega 2}^{\Omega 3} cos\,\Omega\, d\,\Omega + r\,p_2 \int_{\Omega 1}^{\Omega 2} cos\,\Omega\, d\,\Omega +$$
$$+ r\,p_1 \int_0^{\Omega 1} cos\,\Omega\, d\Omega + f_1\, r\,p_1 \int_{\Omega 2}^{\Omega 3} \sin\Omega\, d\,\Omega - f_1\, r\,p_1 \int_0^{\Omega 1} \sin\Omega\, d\,\Omega = 0, \quad (3)$$

$$\Sigma M = fr \mid p_1 \int_{\Omega 2}^{\Omega 3} \mathrm{d}\,\Omega + p_2 \int_{\Omega 0}^{\Omega 2} \mathrm{d}\,\Omega - p_2 \int_{\Omega 1}^{\Omega 0} \mathrm{d}\,\Omega - p_1 \int_0^{\Omega 1} \mathrm{d}\,\Omega - \mathrm{T1} = 0, \quad (4)$$

где f_1 – коэффициент трения почвы по лезвию; tgφ=fgp_1 – нормальная составляющая удельного реактивного сопротивления почвы, при котором возможно начало резания со скольжением, кг/см; p_2 – нормальная составляющая удельного реактивного сопротивления почвы при резании лезвием без скольжения, кг/см; P – тяговое усилие в кг; T – сила трения на боковых поверхностях дискового ножа, кг; Q – вертикальная сила, необходимая для удержания дискового ножа в почве, кг.

Для замыкания представленной системы уравнений статики геометрические пределы интегрирования определяются границами контакта дискового рабочего органа с почвенным массивом гребня. Вектор интегрирования распределенных нагрузок по дуге погружения диска ограничен углами $\Omega 1$ (точка входа лезвия в почву) и $\Omega 2$ (точка выхода), которые однозначно находятся из геометрического соотношения cos Ω=(r – h)/r, где r – радиус диска, h – глубина хода диска. В условиях прецизионного подрезания корневой системы картофеля в Нижнем Поволжье (светло-каштановые почвы) расчет системы уравнений выполняется при следующих базовых значениях: глубина погружения h=12...15 см, что соответствует технологическому регламенту обработки гребня, радиус экспериментального диска r=255 мм, угол заточки лезвия 25 º, коэффициент трения почвы о сталь f=0,45, удельное давление почвы на боковую поверхность q=0,15...0,25 кг/см^2 (определено экспериментально с помощью полевого штампа-плотномера).

Величина центральных углов Ω_0, Ω_1, Ω_2, Ω_3 зависит от величины коэффициента скольжения, при этом они связаны следующими зависимостями:

$$\Omega_1 = \Omega_0 - \varphi,\ \Omega_2 = \Omega_0 + \varphi, \cos\ \Omega_3 = \frac{r-h}{r},\ \cos\ \Omega_0 = \frac{r}{r+\Delta r},$$

где h – глубина резания дискового ножа; φ – угол трения почвы по лезвию; r – радиус дискового ножа.

Проведя замену углов Ω_1 и Ω_2 через углы Ω_0 и Ω_3 и подставив их в уравнения (8) и (9) путем замены суммы тригонометрических функций через их выражения, а также после группировки членов и замены:

$$f_1 = tg\,\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}.$$

Из уравнений (2) и (3) после интегрирования и подстановки пределов можем записать:

$$P = T + p_1\,(h - tg\,\varphi\,\sqrt{2rh - r^2}) + 2\,p_2\,\frac{r^2}{r+\Delta r}\cos\ \varphi, \quad (5)$$

$$Q = p_1\,\sqrt{2rh - h^2} + \frac{2\,r^2}{r+\Delta r}\,(p_2 - p_1)\,sin\ \varphi + p_1(2\,r - h)\ tg\ \varphi +$$
$$+ p_1\,\frac{2\,r}{r+\Delta r}\,\sqrt{2r\,\Delta\,r + \Delta r^2}\ tg\ \varphi \cdot sin\ \varphi. \quad (6)$$

Полученные формулы правильно отображают процесс резания почвы дисковым ножом, так как формула (5) состоит из трех членов: первый член отображает усилие, идущее па преодоление сил трения на боковых поверхностях диска; второй член – затрату усилия на резание почвы лезвием со скольжением; третий член – затрату усилия на резание почвы лезвием без скольжения. Пользуясь формулами (5) и (6), можно определить усилие резания и вертикальную реакцию дискового ножа. При этом величина p_1 и p_2 определяется состоянием лезвия дискового ножа и физико-механическими свойствами почвы.

Математический анализ кинематики по уравнениям статики (2) и (3) показал важную закономерность: на погруженном в почву лезвии диска одновременно возникают три зоны взаимодействия — одна из них разрезает почву без скольжения, а две — со скольжением. Как видно из формулы (4), полное тяговое сопротивление диска состоит из трех слагаемых: усилия на преодоление бокового трения, на резание со скольжением и резание без скольжения. Анализ уравнений показывает, что с увеличением диаметра диска при фиксированной глубине общее тяговое усилие снижается.

Однако повышение диаметра диска ограничено конструктивными подходами, ввиду роста сил бокового трения и сильного сжатия почвы внутри гребня, а также качеством выполнения технологического процесса. С ростом диаметра происходит увеличение площади контакта металла с почвой, вызывая лавинообразный рост сил бокового трения, поэтому диск начинает работать как глухой расширяющийся клин, расталкивая откосы гребня.

Отношение глубины погружения диска к его радиусу h/r=0,59 выбрано исходя из оптимального соотношения между долей резания почвы со скольжением и без скольжения. Математический анализ уравнений статики (2), (3) и (4) показал, что при значении h/r=0,59 на лезвии диска увеличивается длина участка, работающего в режиме резания со скольжением.

На основании теоретических расчетов выбран постоянный диаметр дискового ножа, равный 510 миллиметрам, и изготовлен опытный рабочий орган (рис. 9).



Рис. 9 – Апробация опытного рабочего органа для междурядной обработки

Для компенсации упомянутых негативных эффектов теоретически обоснована необходимость внедрения перфорации тела диска. В данном конструктивном решении перфорация выполняет следующие функции: 1) снижает силы бокового трения и защищает свод гребня от разрушения; 2) создает дополнительный вращающий момент, что исключает буксование диска и существенно повышает долю резания именно со скольжением; 3) создает эффект подпора для упругих растительных тканей, фиксируя их в почвенном массиве и полностью исключая выскальзывание корня вдоль лезвия. Это гарантирует максимальную полноту подрезания корней картофеля.

Выводы. На основании представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1.На основании законов механики составлена система уравнений статики (2), (3) и (4), которая полностью описывает условия равновесия сил и моментов, действующих на дисковый нож при его качении со скольжением в почве.

2.Путем решения уравнений статики получена аналитическая зависимость тягового усилия от диаметра диска. Математически доказано, что полное тяговое сопротивление диска состоит из трех слагаемых: усилий на преодоление бокового трения, на резание лезвием со скольжением и на резание без скольжения. Теоретический анализ формулы тягового усилия показал, что увеличение радиуса диска при фиксированной глубине обработки снижает общее тяговое сопротивление почвы за счет увеличения длины участка лезвия, работающего в режиме чистого резания со скольжением.

3.Обоснован диаметр дискового ножа, равный 510 мм, при этом отношение глубины погружения к радиусу диска равно h/r=0,59, что обеспечивает наилучшее соотношение между долей резания почвы со скольжением и без скольжения для выполнения технологического процесса стимулирующего воздействия на корневую систему картофеля. Для компенсации негативных клиновых эффектов теоретически обоснована необходимость внедрения перфорации тела диска.

4.Производственные испытания разработанного технического средства в семеноводческих посевах картофеля подтвердили высокий процент срезанных корней картофеля по критерию – $k_{ср}$=97,8 %.

Исследования проведены в рамках НИР Минобрнауки РФ *«Разработка ресурсосберегающих машин для возделывания сельскохозяйственных культур и систем рационального использования агробиоценозов на основе инновационных цифровых технологий в условиях рискованного земледелия для получения экологически чистых продуктов переработки растительного сырья».*

Библиография

1. Джабборов Н.И. Оптимальное проектирование почвообрабатывающих машин с учетом их потребной мощности / Н. И. Джабборов, А. В. Добринов // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 1(106). С. 50–62. DOI 10.24411/2713-2641-2021-10277. EDN DWYXAL.

2. Иовлев Г.А. Нормативы потребности в сельскохозяйственной технике: анализ и практика применения / Г. А. Иовлев // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2020. № 8. С. 62–66. DOI 10.31442/0235-2494-2020-0-8-62-66. EDN PCPRSU.

3. Совершенствование технологии междурядной обработки пропашных культур / В. И. Бородин, И. С. Мартынов, М. Н. Шапров [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2025. № 3(81). С. 557–567. DOI 10.32786/2071-9485-2025-03-62. EDN RGUNNS.

4. Анализ способов ухода за посевами пропашных культур / В. И. Курдюмов, Е. С. Зыкин, С. А. Лазуткина, О. А. Дмитриев // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы X Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Ульяновск, 23 июня 2020 года. Том 2020-2. Ульяновск : Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2020. С. 346–351. EDN NYTSZD.

5. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства / А. Ю. Измайлов, Н. Н. Колчин, Я. П. Лобачевский, Н. Г. Кынев // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 3. С. 43–47. EDN TTLVUJ.

6. Демин Е.А. Влияние междурядной обработки и гербицида на засоренность посевов кукурузы в условиях лесостепной зоны Зауралья / Е. А. Демин // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. № 3(66). С. 25–29. EDN XTJIHR.

7. Дорохов А.С. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений / А. С. Дорохов, И. А. Старостин, А. В. Ещин // Агроинженерия. 2021. № 1(101). С. 26–35. DOI 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35. EDN EGCOXM.

8. Кулиев С.Р. Влияние комплексных мер борьбы на динамику распространения сорняков в посевах кукурузы / С. Р. Кулиев // Аграрная наука. 2019. № 7–8. С. 50–53. DOI 10.32634/0869-8155-2019-330-7-50-53. EDN VCJGSX.

9. Мазур В.В. Оценка эффективности применения комбинаций рабочих органов культиватора для возделывания кукурузы / В. В. Мазур // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 37–41. DOI 10.26897/2687-1149-2022-4-37-41. EDN IEUOPS.

10. Микроструктура и абразивная износостойкость тяжелонагруженных деталей чизельных плугов из высокопрочного чугуна / Л. В. Костылева, Д. С. Гапич, В. А. Моторин, А. Е. Новиков // Черные металлы. 2019. № 3. С. 37–42. EDN NQDHLR.

11. Шишлов С.А. Кинематические параметры рабочего органа с изменяемой глубиной обработки почвы по ширине междурядья / С. А. Шишлов, А. Н. Шишлов, А. А. Фадеев // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Т. 16, № 3. С. 130–134. DOI 10.22450/199996837_2022_3_130. EDN FOMAKH.

12. Моторин В.А. Концептуальные основы использования высокоуглеродистых сплавов в технологиях упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Моторин Вадим Андреевич, 2022. 385 с. EDN GYZROE.

13. Захаров А.М. Теоретическое обоснование конструктивных параметров рабочего органа автоматизированной секции культиватора / А. М. Захаров, Е. А. Мурзаев, А. Д. Комоедов // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2(119). С. 58–71. DOI 10.24412/2713-2641-2024-2119-58-70. EDN AMYRAD.

14. Аналитическое исследование взаимосвязи условий хранения семенного картофеля в картофелехранилищах с последующей предпосадочной обработкой / Д. В. Колошеин, С. Н. Борычев, А. С. Попов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2024. Т. 16, № 4. С. 93–99. DOI 10.36508/RSATU.2024.23.75.014. EDN HPCURG.

15. Повышение качества поверхностной обработки почвы / С. Е. Федоров, А. А. Жалнин, Н. А. Жалнин, А. А. Полункин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2020. № 4(48). С. 121–127. DOI 10.36508/RSATU.2020.48.4.017. EDN PATXUG.

16. Оптимизация параметров рабочих органов культиваторов / М. Н. Чаткин, С. Е. Федоров, М. В. Бычков, А. А. Жалнин // тесНика. 2020. № 1. С. 34–36. DOI 10.24411/2181-0753/2020-10007. EDN UHEEVK.

17. Composition and tribological properties of hardened cutting blades of tillage machines under abrasive deterioration / A. E. Novikov, M. I. Lamskova, M. I. Filimonov, V. A. Motorin // Journal of Friction and Wear. 2018. Т. 39. № 2. P. 158–163.

18. Motorin V.A. Increasing wear resistance of chizel tools working bodies based on improving the metallographic structure of grey cast iron / V. A. Motorin, L. V. Kostyleva, D. S. Gapich // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 652–657. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.652. EDN JMDMSL.

19. Simulation of the Wear of the Working Bodies of Chisel Plows / V. A. Motorin, D. S. Gapich, I. B. Borisenko, D. B. Kurbanov // Journal of Friction and Wear. 2020. Vol. 41, № 1. P. 71–77. DOI 10.3103/S1068366620010134. EDN LOKSUS.

20. Wear-Resistant Cast Iron Containing Spheroidal Graphite with a Two-Layer Ledeburitic–Martensitic Shell / L. V. Kostyleva, D. S. Gapich, V. A. Motorin, A. E. Novikov // Russian Metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020, № 3. P. 231–237. DOI 10.1134/S0036029520030064. EDN YAADNS.

Reference

1. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Optimal'noe proektirovanie pochvoobrabatyvayushchikh mashin s uchetom ikh potrebnoi moshchnosti [Optimal design of tillage machines taking into account their required power] // AgroEkoInzheneriya [AgroEcoEngineering]. 2021. № 1(106). Pp. 50–62. (In Russ.). DOI: 10.24411/2713-2641-2021-10277.

2. Iovlev G.A. Normativy potrebnosti v sel'skokhozyaistvennoi tekhnike: analiz i praktika primeneniya [Standards for the need for agricultural machinery: analysis and practice of application] // Ekonomika sel'skokhozyaistvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatii [Economy of Agricultural and Processing Enterprises]. 2020. № 8. Pp. 62–66. (In Russ.). DOI: 10.31442/0235-2494-2020-0-8-62-66.

3. Borodin V.I., Martynov I.S., Shaprov M.N., Sedov A.V., Sadovnikov M.A., Boiko S.Yu. Sovershenstvovanie tekhnologii mezhduryadnoi obrabotki propashnykh kul'tur [Improving the technology of inter-row cultivation of row crops] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Izvestia of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Vocational Education]. 2025. № 3(81). Pp. 557–567. (In Russ.). DOI: 10.32786/2071-9485-2025-03-62.

4. Kurdyumov V.I., Zykin E.S., Lazutkina S.A., Dmitriev O.A. Analiz sposobov ukhoda za posevami propashnykh kul'tur [Analysis of methods for caring for row crops] // Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i

puti ikh resheniya: Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 2-kh tomakh, Ulyanovsk, 23 iyunya 2020 goda. Tom 2020-2 [Agricultural Science and Education at the Present Stage of Development: Experience, Problems and Ways to Solve Them: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference. In 2 volumes, Ulyanovsk, June 23, 2020. Vol. 2020-2]. Ulyanovsk : Ulyanovsk State Agricultural University named after P.A. Stolypin Publ. 2020. Pp. 346–351. (In Russ.).

5. Izmailov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevsky Ya.P., Kynev N.G. Sovremennye tekhnologii i spetsial'naya tekhnika dlya kartofelevodstva [Modern technologies and special equipment for potato growing] // Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii [Agricultural Machinery and Technologies]. 2015. № 3. Pp. 43–47. (In Russ.)

6. Demin E.A. Vliyanie mezhduryadnoi obrabotki i gerbitsida na zasorennost' posevov kukuruzy v usloviyakh lesostepnoi zony Zaural'ya [The influence of inter-row cultivation and herbicide on weed infestation of maize crops in the conditions of the forest-steppe zone of the Trans-Urals] // Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Michurinsk State Pedagogical University]. 2021. № 3(66). Pp. 25–29. (In Russ.).

7. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin V.V. Perspektivy razvitiya metodov i tekhnicheskikh sredstv zashchity sel'skokhozyaistvennykh rastenii [Prospects for the development of methods and technical means of agricultural plant protection] // Agroinzheneriya [Agricultural Engineering]. 2021. № 1(101). Pp. 26–35. (In Russ.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.

8. Kuliev S.R. Vliyanie kompleksnykh mer bor'by na dinamiku rasprostraneniya sornyakov v posevakh kukuruzy [Influence of complex control measures on the dynamics of weed distribution in corn crops] // Agrarnaya nauka [Agricultural Science]. 2019. № 7–8. Pp. 50–53. (In Russ.). DOI: 10.32634/0869-8155-2019-330-7-50-53.

9. Mazur V.V. Otsenka effektivnosti primeneniya kombinatsii rabochikh organov kul'tivatora dlya vozdelyvaniya kukuruzy [Evaluating the efficiency of using cultivator tool combinations for maize cultivation] // Agroinzheneriya [Agricultural Engineering]. 2022. Vol. 24, № 4. Pp. 37–41. (In Russ.). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-37-41.

10. Kostyleva L.V., Gapich D.S., Motorin V.A., Novikov A.E. Mikrostruktura i abrazivnaya iznosostoikost' tyazhelonagruzhennykh detalei chisel'nykh plugov iz vysokoprochnogo chuguna [Microstructure and abrasive wear resistance of heavy-loaded parts of chisel plows made of high-strength cast iron] // Chernye metally [Ferrous Metals]. 2019. № 3. Pp. 37–42. (In Russ.)

11. Shishlov S.A., Shishlov A.N., Fadeev A.A. Kinematicheskie parametry rabochego organa s izmenyaemoi glubinoi obrabotki pochvy po shirine mezhduryad'ya [Kinematic parameters of the working tool with variable soil tillage depth along the inter-row width] // Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik [Far Eastern Agrarian Herald]. 2022. Vol. 16. № 3. Pp. 130–134. (In Russ.). DOI: 10.22450/199996837_2022_3_130.

12. Motorin V.A. Kontseptual'nye osnovy ispol'zovaniya vysokouglerodistykh splavov v tekhnologiyakh uprochneniya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Conceptual foundations of using high-carbon alloys in technologies for hardening the working tools of tillage machines]. Doctoral dissertation (Eng.). Volgograd, 2022. 385 p. (In Russ.)

13. Zakharov A.M., Murzaev E.A., Komoedov A.D. Teoreticheskoe obosnovanie konstruktivnykh parametrov rabochego organa avtomatizirovannoi sektsii kul'tivatora [Theoretical substantiation of design parameters of the working tool of an automated cultivator section] // AgroEkoInzheneriya [AgroEcoEngineering]. 2024. № 2(119). Pp. 58–71. (In Russ.). DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-58-70.

14. Koloshein D.V., Borychev S.N., Popov A.S., Ryabchikov S.V., Bezmanov V.V. Analiticheskoe issledovanie vzaimosvyazi uslovii khraneniya semennogo kartofelya v kartofelekhranilishchakh s posleduyushchei predposadochnoi obrabotkoi [Analytical study of the relationship between storage conditions of seed potatoes in potato storage facilities and subsequent pre-planting treatment] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva [Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev]. 2024. Vol. 16. № 4. Pp. 93–99. (In Russ.). DOI: 10.36508/RSATU.2024.23.75.014.

15. Fedorov S.E., Zhalnin A.A., Zhalnin N.A., Polunkin A.A. Povyshenie kachestva poverkhnostnoi obrabotki pochvy [Improving the quality of surface soil tillage] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva [Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev]. 2020. № 4(48). Pp. 121–127. (In Russ.). DOI: 10.36508/RSATU.2020.48.4.017.

16. Chatkin M.N., Fedorov S.E., Bychkov M.V., Zhalnin A.A. Optimizatsiya parametrov rabochikh organov kul'tivatorov [Optimization of parameters of cultivator working tools] // tecHnika. 2020. № 1. Pp. 34–36. (In Russ.). DOI: 10.24411/2181-0753/2020-10007.

17. Composition and tribological properties of hardened cutting blades of tillage machines under abrasive deterioration / A. E. Novikov, M. I. Lamskova, M. I. Filimonov, V. A. Motorin // Journal of Friction and Wear. 2018. T. 39. № 2. P. 158–163.

18. Motorin V.A. Increasing wear resistance of chizel tools working bodies based on improving the metallographic structure of grey cast iron / V. A. Motorin, L. V. Kostyleva, D. S. Gapich // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 652–657. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.652. EDN JMDMSL.

19. Simulation of the Wear of the Working Bodies of Chisel Plows / V. A. Motorin, D. S. Gapich, I. B. Borisenko, D. B. Kurbanov // Journal of Friction and Wear. 2020. Vol. 41, № 1. P. 71–77. DOI 10.3103/S1068366620010134. EDN LOKSUS.

20. Wear-Resistant Cast Iron Containing Spheroidal Graphite with a Two-Layer Ledeburitic–Martensitic Shell / L. V. Kostyleva, D. S. Gapich, V. A. Motorin, A. E. Novikov // Russian Metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020, № 3. P. 231–237. DOI 10.1134/S0036029520030064. EDN YAADNS.

Сведения об авторах

Моторин Вадим Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и технического сервиса машин в АПК, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, 400002, тел. 89876512921, e-mail: vmotorin001@yandex.ru;

Гапич Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры, и. о. заведующего кафедрой «Сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций», ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева», Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49, 127434, тел. 89272577735, e-mail: gds-08@mail.ru;

Борисенко Иван Борисович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры земледелия и агрохимии, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, 400002, тел. 89023872942, e-mail: borisenivan@yandex.ru;

Скрипкин Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технических систем в АПК, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, 400002, тел. 89033703219, e-mail: umka525@mail.ru;

Денисова Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Педагогика и методика профессионального обучения», ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, 400002, тел. 89272577735, e-mail: gds-08@mail.ru;

Кошенсков Юрий Сергеевич, аспирант кафедры эксплуатации и технического сервиса машин в АПК, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, Южный федеральный округ, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26, 400002, тел. 89377079002, e-mail: yura-rf@yandex.ru.

Information about authors

Motorin Vadim Andreevich, doctor of technical sciences, professor of the department of operation and technical service of machines in the agro-industrial complex, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Agrarian University», Southern Federal District, Volgograd Region, Volgograd, pr. Universitetskiy, 26, 400002, tel. 89876512921, e-mail: vmotorin001@yandex.ru;

Gapich Dmitry Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department, Acting Head of the Department of Agricultural Water Supply, Wastewater Disposal, Pumps and Pump Stations, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, 127434, tel. 89272577735, e-mail: gds-08@mail.ru;

Borisenko Ivan Borisovich, doctor of technical sciences, chief researcher, professor of the department of agriculture and agrochemistry, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Agrarian University», Southern Federal District, Volgograd Region, Volgograd, pr. Universitetskiy, 26, 400002, tel. 89023872942, e-mail: borisenivan@yandex.ru;

Skripkin Dmitry Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of technical systems in agriculture, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Agrarian University», Southern Federal District, Volgograd Region, Volgograd, pr. Universitetskiy, 26, 400002, tel. 89033703219, e-mail: umka525@mail.ru;

Denisova Olga Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Pedagogy and Methods of Vocational Training, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Agrarian University», Southern Federal District, Southern Federal District, Volgograd Region, Volgograd, pr. Universitetskiy, 26, 400002, tel. 89272577735, e-mail: gds-08@mail.ru;

Koshenskov Yuri Sergeevich, postgraduate student at the department of operation and technical service of machines in agriculture, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Agrarian University», Southern Federal District, Volgograd Region, Volgograd, pr. Universitetskiy, 26, 400002, tel. 89377079002, e-mail: yura-rf@yandex.ru.

УДК 004.932.7

Е.Н. Неверов, П.С. Руднев, А.Л. Майтаков

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ КАМЕРЫ В ОБЪЁМЕ КУРИНЫХ ЯИЦ В ПРОЦЕССЕ ИНКУБАЦИИ

Аннотация. Птицеводческая продукция в настоящее время пользуется высоким спросом. Оценка качества яиц перед инкубацией и на различных её стадиях является важным фактором их выводимости. Применение систем компьютерного зрения для оценки пригодности яиц к инкубации позволит исключить, либо значительно снизить инвазивность данного процесса за счёт исключения необходимости извлечения образца из инкубационной камеры для овоскопии. В работе описана система компьютерного зрения для измерения размеров и положения воздушной камеры куриных яиц в целях оценки его пригодности к инкубации путём совмещения анализа изображений образцов в видимом и инфракрасном спектрах. Система компьютерного зрения позволяет получать снимки в видимом и инфракрасном спектре электромагнитного излучения и распознавать контуры яиц и их воздушных камер. С использованием выбранных аппаратного и программного обеспечения система компьютерного зрения была испытана на 17 партиях инкубационных куриных яиц. Оценена точность измерения системой компьютерного зрения относительных размеров воздушных камер куриных яиц путём сравнения значений, полученных системой компьютерного зрения, со значениями, полученными посредством ручного измерения цифровым штангенциркулем. Средняя относительная погрешность измерений составила 1,59 %, что свидетельствует о достаточной точности измерений относительных размеров и положения воздушной камеры с применением системы компьютерного зрения. При оценке влияния применения СКЗ на вывод птенцов выявлено увеличение среднего вывода на 3,38 %. Выявлена зависимость вывода птенцов от среднего относительного диаметра воздушной камеры, подтверждающая факт негативного влияния избыточного объёма воздушной камеры на развитие зародыша.

Ключевые слова: оценка качества, компьютерное зрение, классификация куриных яиц, микрокомпьютер, съёмка в инфракрасном спектре, контур яиц, детектирование, пиксели, измерения.

DEVELOPMENT OF A COMPUTER VISION SYSTEM FOR ASSESSING THE AIR CELL POSITION IN CHICKEN EGGS DURING INCUBATION

Abstract. Poultry products are currently in high demand. Assessing the quality of eggs before incubation and at various stages of incubation is an important factor in their hatchability. The use of computer vision systems to assess the suitability of eggs for incubation can eliminate or significantly reduce the invasiveness of this process by eliminating the need to remove the sample from the incubation chamber for ovoscopy. This paper describes a computer vision system for measuring the size and position of the air chamber of chicken eggs in order to assess their suitability for incubation by combining the analysis of images of the samples in the visible and infrared spectra. The computer vision system allows to obtain images in the visible and infrared spectrum and recognizing the contours of the eggs and their air chambers. Using the selected hardware and software, the computer vision system was tested on 17 batches of chicken eggs. The accuracy of the computer vision system's measurement of the relative sizes of the air chambers in chicken eggs was evaluated by comparing the values obtained by the computer vision system with the values obtained by manual measurement using a digital caliper. The average relative error in the measurements was 1.59 %, indicating that the computer vision system provides sufficient accuracy in measuring the relative sizes and positions of the air chambers. When evaluating the impact of the computer vision system on the hatching of chicks, an increase in the average hatching rate of 3.38 % was observed. The dependence of chick hatching on the average relative diameter of the air chamber has been revealed, confirming the negative effect of excessive air chamber volume on embryo development.

Keywords: quality assessment, computer vision, chicken egg classification, microcomputer, infrared imaging, egg contour, detection, pixels, measurements.

Введение. Оценка качества куриных яиц является важным этапом производства птицеводческой продукции. Отбраковка яиц позволяет обеспечить экономию ресурсов и пространства в инкубационной и выводной камерах, равномерность вывода и предотвращение гниения. Применение систем компьютерного зрения (СКЗ) в данном процессе позволит увеличить его скорость, снизить влияние человеческого фактора и инвазивность. Одними из оцениваемых характеристик куриного яйца являются диаметр и высота воздушной камеры. Повышенный объём воздушной камеры говорит об избытке воздуха и недостатке влаги в яйце, что негативно сказывается на развитии зародыша и свидетельствует о высокой вероятности вывода нездорового птенца либо отсутствия вывода [1]. Разработка новых СКЗ не может быть проведена без опоры на опыт, полученный при разработке и совершенствовании существующих СКЗ для оценки качества куриных яиц.

В исследовании [2] предлагается новая система оценки объема куриного яйца, основанная на компьютерном зрении и методах машинного обучения для яиц без окклюзии и частичной окклюзии. Предлагаемая система инфракрасных датчиков глубины может быть применена в условиях производственной линии для прогнозирования объема яиц как одиночных объектов, так и при частичной окклюзии с минимальными ошибками.

В рамках исследования [3] были разработаны две системы для птицеводства: система локализации и анализа яиц в клетках и система определения качества яиц, обе из которых используют технологии машинного зрения и глубокого обучения. Эти системы автоматизируют процессы локализации, анализа и определения качества яиц, удовлетворяя практические потребности отрасли.

В работе [4] были разработаны, обучены и сравнены 3 новые модели глубокого обучения, а именно сети *YOLOv5s-egg*, *YOLOv5x-egg* и *YOLOv7-egg* при отслеживании напольных яиц в 4 исследовательских помещениях для кур-несушек. Модель *YOLOv5x-egg* обнаруживала напольные яйца с более высокой точностью, чем *YOLOv5s-egg* и *YOLOv7-egg*.

© Неверов Е. Н., Руднев П. С., Майтаков А. Л., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Авторами работы [5] предложен новый метод обнаружения трещин в яичной скорлупе на основе машинного зрения. Экспериментальные результаты показали, что предложенный метод эффективен при сложных условиях видимости поверхности яйца, таких как нерегулярные темные пятна и невидимые микротрещины, с коэффициентом распознавания треснувшего яйца 92,5%.

В статье [6] предлагается метод, объединяющий машинное зрение и усовершенствованную облегченную модель для неразрушающего определения оплодотворения яиц голубей-производителей на раннем этапе высиживания путем использования разницы в светопропускании в процессе развития яиц голубей-производителей. Улучшенная облегченная сеть Mov3-CapNet достигла точности 95,54 % в первый день, точности 98,85 % во второй день, точности 99,73 % в третий день и точности 100 % в четвертый день.

В исследовании [7] алгоритм *MobileOne-YOLO* разработан с использованием сетевой архитектуры *YOLOV7* для обнаружения неоплодотворенных утиных яиц и ранних мертвых эмбрионов.

Исследование [8] продемонстрировало пригодность гиперспектральной реконструкции изображений для прогнозирования смертности куриных эмбрионов в ранний инкубационный период. Методы *XGBoost* и *Random Forest* были применены для дифференциации образцов живых и мертвых эмбрионов с использованием спектров реконструированных изображений.

В исследовании [9] предлагается новая и точная оценка сортировки яиц с использованием глубокой свёрточной нейронной сети, которая представляет собой современный метод компьютерного зрения для выполнения задач классификации. Модель свёрточной нейронной сети достигла средней общей точности 94,84 при 5-кратной перекрестной проверке.

Исследование, представленное в статье [10], направлено на определение выводимости яиц во время инкубации на основе наличия эмбриона. Чтобы получить оптимальный метод обнаружения, не оказывающий отрицательного влияния на процесс инкубации, представленный подход использует компьютерную технологию для анализа изображений, полученных в процессе просвечивания яиц, и для получения информации о наличии эмбриона в яйце. Представленные результаты экспериментов показали, что метод обнаружения *SVM-GLCM* достиг средней точности 98,20 %.

В статье [11] описывается метод обнаружения дефектов на криволинейных поверхностях. В частности, данное исследование фокусируется на дефектах поверхности яиц домашней птицы. Результаты показывают, что предложенная система компьютерного зрения способна определять дефекты на изогнутых поверхностях яиц домашней птицы. Самая высокая эффективность обнаружения составила 97,5 %.

В работах [12-13] представлены системы компьютерного зрения (СКЗ) для оценки свежести и сортировки яиц по весу и плотности. Авторами статьи [14] СКЗ применены для оценки пригодности к инкубации куриных яиц. Для той же задачи, но для оценки утиных яиц, описаны СКЗ в статье [15]: проанализированы изображения не в видимом спектре, а в инфракрасном. В статье [16] особое внимание уделено применению искусственных нейронных сетей в обработке изображений, полученных СКЗ. Для нахождения трещин на поверхности яиц СКЗ – в статье [17-18]. СКЗ для классификации размеров яиц с применением искусственных нейронных сетей описаны в статьях [19-20].

В статье [21] представлена СКЗ для определения большого и малого диаметра куриных яиц для оценки их пригодности к инкубации. Алгоритм распознавания контуров целевых объектов и определения их размеров, описанный в работе, рассчитан на работу в условиях постоянства освещения, взаимного расположения камеры и образцов, и простоты разграничения фона и целевых объектов. Для работы в условиях переменного освещения и расстояния между камерой и образцами данный алгоритм должен быть существенно изменён.

Работа [22] посвящена разработке СКЗ для оценки внешнего вида творога. Программа, описанная в данной работе, способна к выделению одного контура в пределах другого по отличию цветовых характеристик. Подобная задача решается в настоящей работе.

Статья [23] содержит описание управляющей программы устройства инкубации куриных яиц на языке программирования *Python* 3.9.0. Некоторые решения, применённые в данной программе, могут быть использованы для разработки управляющей программы СКЗ для инфракрасной овоскопии куриных яиц.

Опыт авторов работ, описанных в обзорной статье [24], полезен для достижения цели настоящего исследования.

Авторами работ [25-28] особое внимание уделено развитию эмбриона курицы, СКЗ применена для измерения его характеристик.

Содержание вышеописанных источников свидетельствует о росте частоты применения искусственных нейронных сетей в разработке управляющих программ СКЗ и выгодности сочетания компьютерного зрения с другими методами измерения характеристик анализируемых объектов.

Цель настоящей работы заключается в разработке прототипа СКЗ для измерения размеров и положения воздушной камеры куриного яйца для оценки его пригодности к инкубации. Задачи работы включают в себя выбор программного и аппаратного обеспечения, разработку управляющей программы, тестирование программы, оценку точности измерений, проводимых посредством СКЗ, и оценку влияния применения СКЗ на вывод.

Материалы и методы исследования. В качестве исследуемых образцов были применены куриные яйца кросса «Иртыш» [29]. Яйценоскость кур родительского стада за 60 недель жизни – 163 яйца, выход инкубационных яиц – 85 %, вывод цыплят – 81 %. Среднесуточные приросты живой массы от 34 до 36 г. Бройлеры в 7 недель весят в среднем 1760 г при затратах корма 2,2 кг на 1 кг живой массы. Сохранность птицы составляет 98 %.

СКЗ включает в себя микрокомпьютер *Raspberry Pi 4 B*, тепловизионную камеру Gearwell и камеру видимого спектра *Nyereka Tech* (рис. 1).

Микрокомпьютер *Raspberry Pi 4 B* выступает в качестве управляющего элемента установки, имеет 4-ядерный 64-битный центральный процессор, 8 ГБ оперативной памяти, 4 *USB*-порта, *microSD*-карту в качестве постоянного запоминающего устройства. Важной особенностью данного устройства является наличие контактов ввода-вывода общего назначения *GPIO*, позволяющих осуществлять подключение датчиков по однопроводному интерфейсу, за счёт чего может быть проведено расширение функционала установки.

Видеокамера *Nyereka Tech* позволяет производить съёмку в видимом спектре с максимальным разрешением 1920×1080 px, имеет *USB*-вход, что обеспечивает простоту подключения к микрокомпьютеру и управления. Тепловизионная камера *Gearwell* имеет порт USB-C, диапазон температур от -20 до +400 °C, разрешение съёмки 80×62 px с возможностью увеличения масштаба снимка с аппроксимацией контуров.

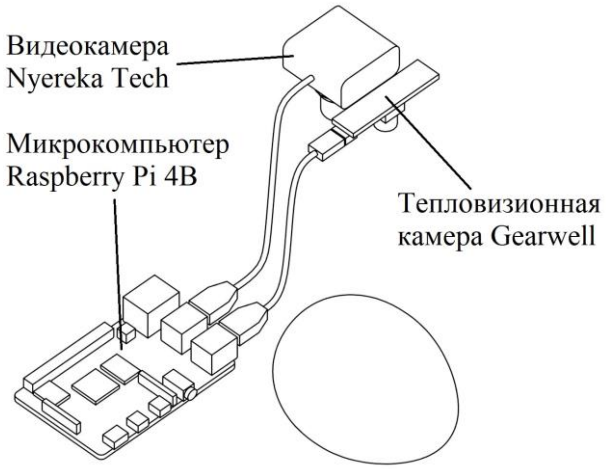


Рис. 1 – Составные элементы СКЗ

Видеокамеры для съёмки в видимом и инфракрасном спектре применяются для получения изображений куриных яиц в пределах инкубационной либо выводной камеры, их взаимное расположение организовано таким образом, что главные оптические оси их объективов параллельны, и оптические центры объективов лежат на перпендикуляре между линиями оптических осей. Постоянство взаимного расположения камер обеспечивается корпусом, изготовленным методом трёхмерной *FDM*-печати пластиком *PLA*.

Для измерения диаметра и высоты воздушной камеры яйца посредством СКЗ яйцо помещается в размеченное положение относительно камер. Камеры находятся над размеченным участком, что позволяет производить съёмку образцов таким образом, чтобы ось их симметрии была перпендикулярна главным оптическим осям объективов камер. Различие ориентации яиц при съёмке состоит в расположении под различными углами в плоскости, перпендикулярной главным оптическим осям объективов камер. Такое различие в ориентации не влияет на погрешность измерений.

Программное обеспечение СКЗ включает в себя среду разработки языка программирования *Python* 3.9.0 (для разработки и запуска управляющей программы). В функционал программы входит захват изображений в видимом и инфракрасном спектрах, распознавание контуров куриных яиц на снимках видимого спектра, нахождение контура воздушной камеры в пределах контура яйца для измерения относительных размеров и положения воздушной камеры и принятия решения о допуске, либо отбраковке яйца перед отправкой в инкубационную камеру. Алгоритм работы написанной в рамках данного исследования управляющей программы представлен на рисунке 2.

На первом шаге алгоритма осуществляется инициализация камеры, подключённой к микрокомпьютеру с помощью последовательного интерфейса. Для инициализации камеры и всех дальнейших операций обработки изображений осуществляется импорт библиотеки *OpenCV-Python*.

На втором шаге производится захват изображений с вышеописанными характеристиками. Для последующего наложения обнаруженных контуров на снимок ИК спектра проводится масштабирование снимка в ИК спектре (рис. 3).

По известным ориентирам на снимке были получены величины вертикального и горизонтального смещений для обнаруженных контуров. Данное смещение необходимо для переноса контуров объектов с изображения в видимом спектре на изображение в ИК спектре.

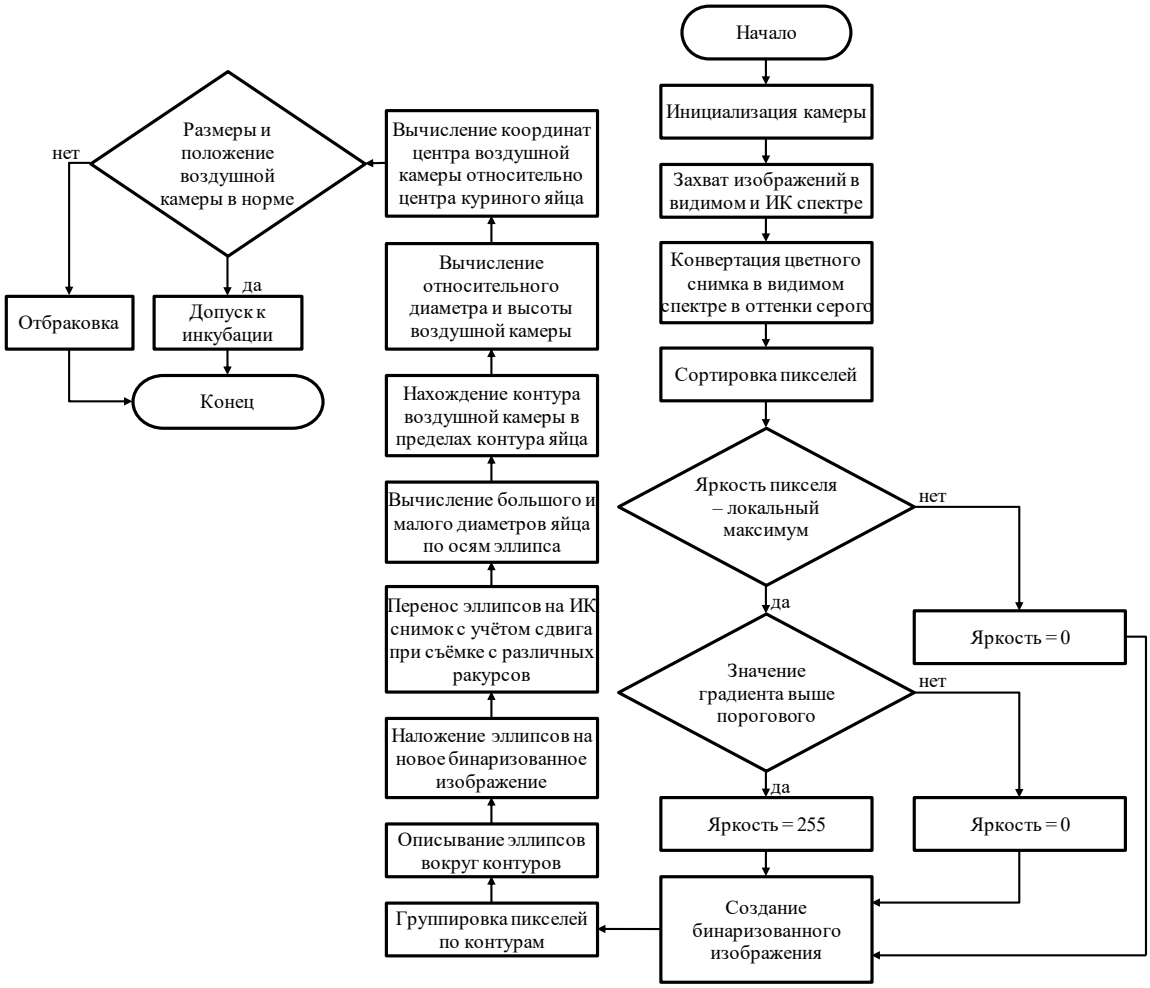


Рис. 2 – Алгоритм работы СКЗ

На третьем шаге алгоритма проводится конвертация изображения из цветного формата (*RGB*) в формат оттенков серого (*grayscale*). Данное действие необходимо для применения алгоритма определения границ объектов на снимке.

Сортировка пикселей на четвёртом шаге подразумевает сравнение значения яркости пикселя со значениями яркости окружающих пикселей.

```
ra=2.3207547169811322
h_shift=56
v_shift=164
na='IV_00431'
t0=cv2.imread(na+'_T.jpg')
v=cv2.imread(na+'_V.jpg')
m=v.copy()
t1=cv2.resize(t0, (int(len(t0[0])/ra),int(len(t0)/ra)))
cv2.imwrite(na+'_small.jpg',t1)
```

Рис. 3 – Скрин-шот участка программы для масштабирования снимка в ИК спектре

На седьмом шаге алгоритма происходит создание бинаризованного изображения (рис. 4, а), в котором пиксели границ объектов имеют значение яркости «255», тогда как яркость остальных пикселей равна нулю.

Восьмой шаг алгоритма включает в себя группировку связанных пикселей по контурам.

На девятом шаге алгоритма осуществляется описание эллипса вокруг обнаруженных контуров. Куриное яйцо не имеет строго эллиптическую форму, но такое допущение позволяет с высокой точностью обнаружить контуры объектов (рис. 4, б).

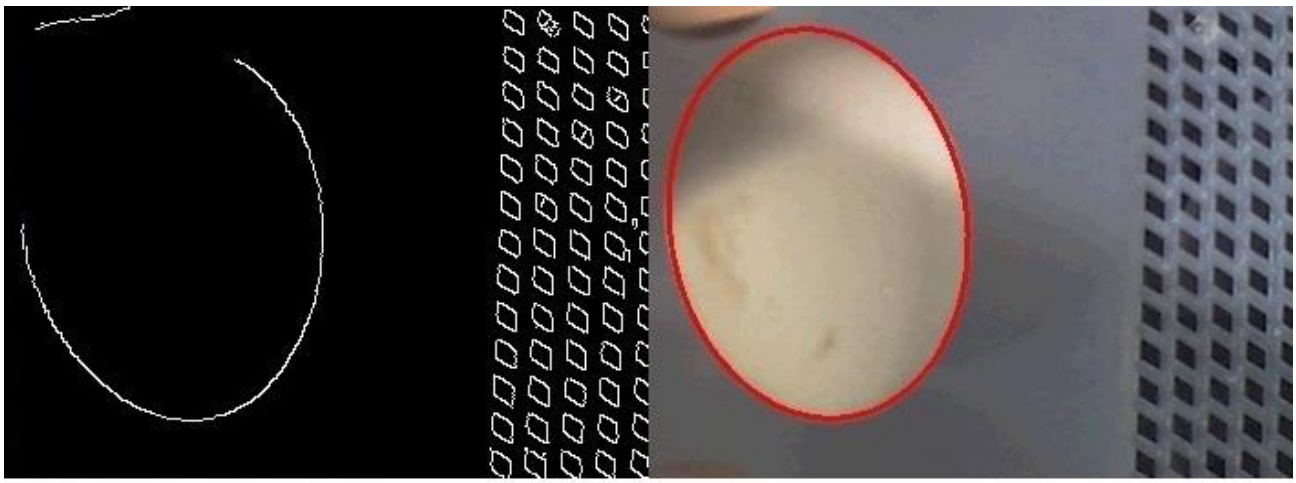


Рис. 4 – Бинаризованное изображение (а) и обнаруженный контур на снимке в видимом спектре (б)

На десятом шаге происходит формирование бинаризованного изображения путём наложения эллипса с заполнением контура на копию отмасштабированного ИК снимка.

На одиннадцатом шаге проводится наложение полученных эллипсов на отмасштабированный снимок в ИК спектре с учётом сдвига относительно изображения в видимом спектре.

Двенадцатый шаг алгоритма подразумевает вычисление большого и малого диаметра яйца. Единицей измерения данных значений является пиксели изображения. Необходимость конвертации в метрические единицы измерения длины отсутствует в силу возможности вычисления соотношений размеров яиц и их воздушных камер.

На тринадцатом шаге алгоритма происходит нахождение контура воздушной камеры яйца (рис. 5, а) по пороговым значениям красной компоненты цветового пространства RGB каждого пикселя в пределах прямоугольной области контура яйца.

При группировке связанных пикселей по контурам проводится присвоение контуров и их площадей спискам для выбора контура максимальной площади. Данный контур наносится на снимок в ИК-спектре (рис. 5, б).

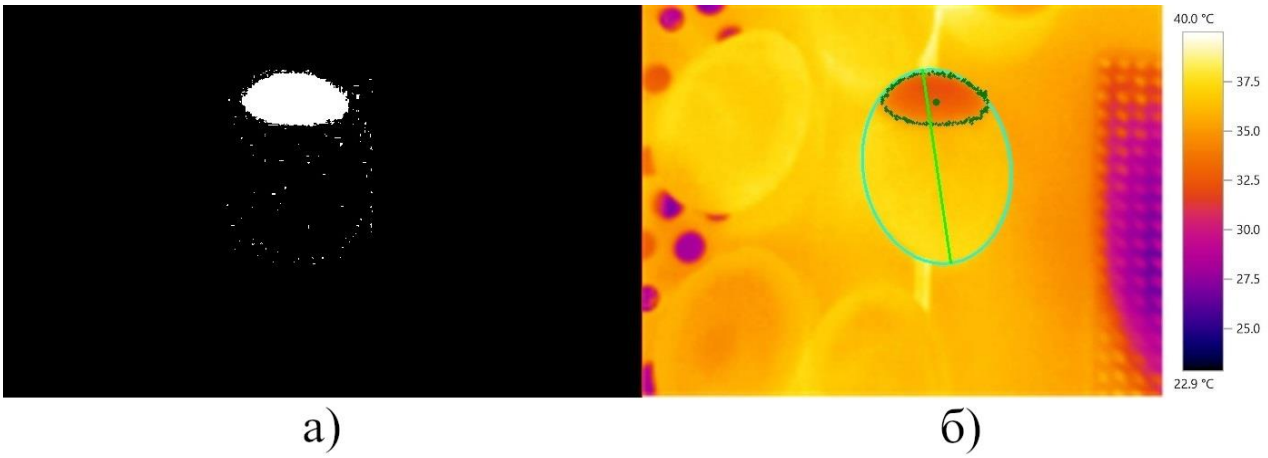


Рис. 5 – Бинаризованное изображение для воздушной камеры яйца (а) и размеченный снимок в ИК спектре (б)

Помимо контура воздушной камеры, на снимок наносится отрезок большого диаметра яйца. На четырнадцатом шаге алгоритма осуществляется получение абсолютных значений диаметра и высоты воздушной камеры по осям эллипса, описанного вокруг контура, и вычисление относительных значений данных величин путём деления на величину малого диаметра яйца.

На пятнадцатом шаге алгоритма проводится вычисление координат центра контура воздушной камеры. Далее происходит вычисление расстояния между геометрическим центром воздушной камеры и линией большого диаметра яйца.

Шестнадцатый шаг алгоритма включает в себя проверку значений расстояния между центром воздушной камеры и оси симметрии яйца, диаметра и высоты воздушной камеры на предмет вхождения в нормальные диапазоны. При несоответствии любого из данных параметров норме яйцо определяется программой как непригодное к инкубации.

Результаты и их обсуждение. Для испытания описанной в предыдущем разделе СКЗ в инкубатор было заложено 4 партии куриных яиц по 30 единиц. На восемнадцатый день инкубации перед отправкой в выводную камеру посредством СКЗ были получены характеристики воздушных камер яиц одной из партий. Исходя из значений полученных характеристик проводилась отбраковка. Эталонный малый диаметр куриного яйца составляет 42 мм, большой диаметр – 57 мм [1]. Максимальная высота воздушной камеры куриного яйца составляет 12 мм [30]. Величина высоты воздушной камеры должна составлять не более 28,57 % от величины малого диаметра куриного яйца. Наибольший допустимый диаметр воздушной ка-

меры составляет 30 мм [30]. Отношение диаметра воздушной камеры к малому диаметру куриного яйца не должно превышать 71,43 %. Смещение центра воздушной камеры яйца относительно оси симметрии яйца не должно превышать её радиуса.

Оценка точности измерения относительных размеров и смещений воздушной камеры в объёме куриного яйца посредством СКЗ производилась путём измерения абсолютной Δ и относительной δ погрешности измерения смещения *s* центра воздушной камеры относительно оси симметрии яйца, её относительных диаметра *d* и высоты *h*. Относительные диаметры получены делением абсолютных величин диаметров на величину малого диаметра для каждого образца. Изначальными единицами измерения абсолютных величин диаметров воздушных камер и малых диаметров яиц являлись миллиметры и пиксели изображения для ШЦЦ-I-125 ГОСТ 166-89 и СКЗ соответственно. Относительные погрешности δ измерений вычислены как отношение ошибки измерения к величине эталона. Данные величины были измерены для тридцати образцов на 21 дне инкубации. В качестве эталонных значений выбраны значения, измеренные посредством электронного штангенциркуля ШЦЦ-I-125. Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений относительных диаметров воздушных камер

	h, %		Δ*h*	δ*h*	*d*, %		Δ*d*	δ*d*	*s*, %		Δ*s*	δ*s*
	ШЦЦ-I-125	СКЗ			ШЦЦ-I-125	СКЗ			ШЦЦ-I-125	СКЗ		
Среднее	28,22	28,13	0,09	0,31 %	69,83	69,76	0,07	0,10 %	3,99	3,90	0,08	4,36 %
Максимум	34,77	34,62	0,15	0,55 %	71,72	71,62	0,15	0,22 %	6,45	6,42	0,15	58,33 %
Минимум	27,11	27,01	0,00	0,00 %	68,21	68,10	0,00	0,00 %	0,12	0,05	0,00	0,00 %
Средняя абсолютная погрешность измерений												0,08
Средняя относительная погрешность измерений												1,59 %

Доля вывода составила 80 %. Отбраковка яиц проводилась согласно двум условиям: превышению доли высоты воздушной камеры 28,57 % и превышению доли диаметра воздушной камеры 71,43 % от величины малого диаметра куриного яйца. Для отбраковки одно или все из перечисленных условий должны быть истинными. Низкие значения средних абсолютной и относительной погрешностей и отсутствие случаев ошибочной отбраковки яиц СКЗ свидетельствуют о допустимости применения СКЗ для оценки качества инкубационных куриных яиц.

При подтверждённой пригодности применения СКЗ для оценки качества куриных яиц проверены зависимость вывода от диаметра воздушной камеры и влияние инвазивности процесса проверки качества яиц на вывод.

Для получения зависимости вывода птенцов от среднего относительного диаметра воздушной камеры яйца было заложено 8 партий яиц по 30 единиц. Числовые значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость вывода от диаметра воздушной камеры

№ партии	1	2	3	4	5	6	7	8
Вывод	83 %	83 %	70 %	73 %	83 %	83 %	83 %	77 %
Средний относительный диаметр воздушной камеры	69,776	69,25	70,07	69,78	69,67	70,00	69,77	69,94

В первой строке таблицы 2 приведены номера партий куриных яиц, заложенных в бытовые инкубаторы одинаковой модели в различные промежутки времени с постоянными условиями микроклимата помещения. Во второй строке приведены доли выведенных птенцов от общего числа яиц, в третьей строке – средний относительный диаметр воздушной камеры для всех яиц в каждой партии. Измерения проводились в 21 день инкубации посредством СКЗ. Данная таблица получена для проверки обратной зависимости вывода птенцов от завышенного объёма воздушных камер яиц. Полученные данные подтверждают данную закономерность.

Графическое представление вышеописанных данных приведено на рисунке 6.

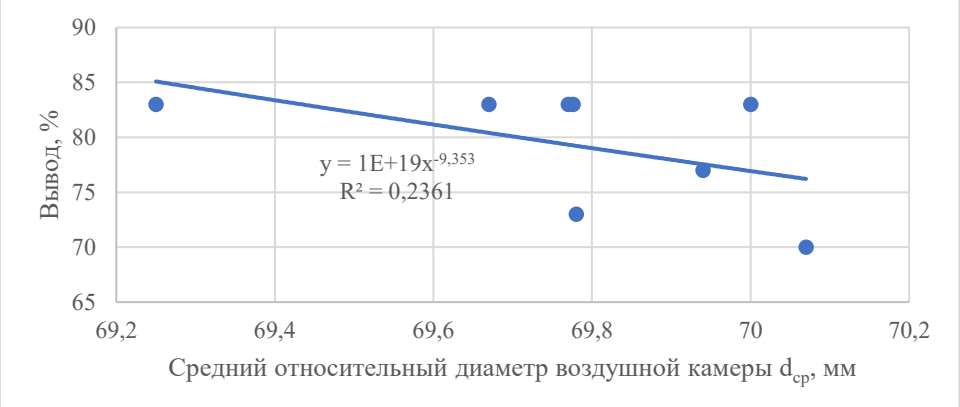


Рис. 6 – Зависимость вывода от диаметра воздушной камеры

Степенная линия тренда на графике зависимости среднего диаметра воздушных камер яиц от вывода является убывающей. Данная закономерность прослеживается в силу недостатка влаги в яйцах с воздушной камерой, размеры которой превышают норму. Излишняя пористость скорлупы может приводить к избыточному удалению влаги и накоплению излишка воздуха в воздушной камере. Недостаток влаги негативно влияет на развитие зародыша и, следовательно, на вывод. Низкое значение коэффициента детерминации R^2 может свидетельствовать о большем влиянии других дефектов инкубационных куриных яиц на вывод птенцов.

Для проверки положительного влияния применения СКЗ на вывод за счёт снижения инвазивности процесса оценки качества яиц было заложено 8 партий по 30 единиц. Полученные данные приведены в таблице 3.

В первой строке таблицы 3 перечислены номера партий куриных яиц по 30 единиц, заложенных в бытовые инкубаторы одинаковой модели при постоянном микроклимате помещения. Всего было заложено 16 партий, по две партии закладывалось в одинаковые моменты времени, после чего на 21 день инкубации оценка качества яиц одной партии проводилась посредством ШЦЦ-I-125, другой партии – с помощью СКЗ. Во второй и третьей строках таблицы 3 приведены значения вывода птенцов. Оценка влияния применения СКЗ на вывод проведена по величине средних значений вывода для партий с применением и без применения СКЗ.

Таблица 3 – Влияние инвазивности процесса оценки качества яиц на вывод

№ партии		1	2	3	4	5	6	7	8	Средний вывод
Вывод	ШЦЦ-I-125	71 %	80 %	79 %	72 %	74 %	79 %	75 %	72 %	75,25 %
	СКЗ	79 %	82 %	80 %	80 %	70 %	80 %	81 %	77 %	78,63 %

Для партий, для оценки качества яиц которых применена СКЗ, наблюдается превышение среднего вывода на 3,38 % по сравнению с партиями, оценка качества которых производилась конвенциональным методом. Причиной повышения среднего вывода может являться снижение времени нарушения температурного режима для анализируемых образцов.

Выводы. В рамках данной работы были получены следующие результаты.

1.Разработан и протестирован прототип системы компьютерного зрения для измерения размеров и положения воздушной камеры куриных яиц в целях оценки его пригодности к инкубации путём совмещения анализа изображений образцов в видимом и инфракрасном спектрах.

2.С использованием выбранных аппаратного и программного обеспечения СКЗ была испытана на 17 партиях инкубационных куриных яиц. Средняя относительная погрешность измерений составила 1,59 %, что свидетельствует о достаточной точности измерений относительных размеров и положения воздушной камеры с применением СКЗ.

3.При оценке влияния применения СКЗ на вывод птенцов выявлено увеличение среднего вывода на 3,38 %.

4.СКЗ может быть применена не только для отбраковки, но и для отслеживания динамики изменения размеров воздушной камеры куриного яйца в процессе инкубации.

Библиография

1. Воздушная камера яйца [Электронный ресурс] // Сельскохозяйственная электронная библиотека знаний. URL: https://www.cnshb.ru/AKDiL/0062/base/RV/000083.shtm (дата обращения: 25.03.2026).

2. Cedric O., Yuwen S., Innocent N., Tchalla K., Samwel O., Jintao W., Mingxia S. Egg volume estimation based on image processing and computer vision // Journal of Food Engineering. 2020. V. 283. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110041.

3. Zhenlong W., Hengyuan Z., Cheng F. Research on machine vision online monitoring system for egg production and quality in cage environment // Poultry Science. 2025. V. 104. № 1. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104552.

4. Sachin S., Ramesh B., Xiao Y., Lilong C. Tracking floor eggs with machine vision in cage-free hen houses // Poultry Science. 2023. V. 102. № 6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102637.

5. Bao G., Jia M., Xun Y., Cai S., Yang Q. Cracked egg recognition based on machine vision // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. V. 158. P. 159–166. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.005.

6. Zhanhong H., Ken C., Gengsheng X., Qiusen F., Yanzhu F., Huazhou C., Hongwei Y., Ziying W., Qinyong L. Early-stage fertilization detection in pigeon eggs during incubation using improved lightweight model // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. V. 215. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108422.

7. Qingxu L., Ziyan S., Wanhuai Z., Qianrui S., Qiaohua W. MobileOne-YOLO: Improving the YOLOv7 network for the detection of unfertilized duck eggs and early duck embryo development - a novel approach // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. V. 214. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108316.

8. Md. Toukir A., Md. Wadud A., Ocean M., Jason L.E., Girish C., Mohammed K. Hyperspectral image reconstruction for predicting chick embryo mortality towards advancing egg and hatchery industry // Smart Agricultural Technology. 2024. V. 9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100533.

9. Amin N., Mahmoud O., Amin T.-G. An automatic sorting system for unwashed eggs using deep learning // Journal of Food Engineering. 2020. V. 283. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110036.

10. Mota-Grajales R., Torres-Peña J.C., Camas-Anzueto J.L., Pérez-Patricio M., Grajales Coutiño R., López-Estrada F.R., Escobar-Gómez E.N., Guerra-Crespo H. Defect detection in eggshell using a vision system to ensure the incubation in poultry production // Measurement. 2019. V. 135. P. 39–46. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.059.

11. Computer vision-based automatic system for egg grading and defect detection / X. Yang, R.B. Bist, S. Subedi [et al.] // Animals. 2023. V. 13. P. 23–54. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13142354.

12. Non-destructive detection of pre-incubated chicken egg fertility using hyperspectral imaging and machine learning / A. Wadud, S. Asher, L. E. Jason [et al.] // Smart Agricultural Technology. 2025. V. 10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100857.

13. Shofan S., Rafał D. Non-destructive egg fertility detection in incubation using SVM classifier based on GLCM parameters // Procedia Computer Science. 2022. V. 207. P. 3254–3263. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.383.

14. CVAE-DF: A hybrid deep learning framework for fertilization status detection of pre incubation duck eggs based on VIS/NIR spectroscopy / D. Wang, Q. Wang, Z. Chen [et al.] // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2024. V. 320. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.saa.2024.124569.

15. Digital imaging assisted geometry of chicken eggs using Hügelschäffer's model / V. G. Narushin, M. N. Romanov, G. Lu [et al.] // Biosystems Engineering. 2020. V. 197. P. 45–55. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.008.

16. Crack detection on duck eggs using CNN / R. G. Caballero, J. R. Gucor, R. D. P. Talledo [et al.] // Procedia Computer Science. 2025. V. 257. P. 631–636. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.081.

17. Eggshell biometrics for individual egg identification based on convolutional neural networks / Z. Chen, P. He, Y. He [et al.] // Poultry Science. 2023. V. 102. № 4. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psj. 2023.102540.

18. Nakaguchi V.M., Abeyrathna R.M.R.D., Ahamed T. Development of a new grading system for quail eggs using a deep learning-based machine vision system // Computers and Electronics in Agriculture. 2024. V. 226. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag. 2024.109433.

19. Victor Massaki Nakaguchi, R.M. Rasika D. Abeyrathna, Tofael Ahamed. Development of a new grading system for quail eggs using a deep learning based machine vision system. Computers and Electronics in Agriculture. Volume 226. 2024. 109433. ISSN 0168 1699. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109433.

20. Eggshell biometrics for individual egg identification based on convolutional neural networks / Chen Zhonghao, He Pengguang, He Yefan [et al.] Poultry Science, Volume 102, Issue 4. 2023. 102540. ISSN 0032-5791. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102540.

21. Разработка системы компьютерного зрения для неразрушающей оценки качества и классификации куриных яиц / Г. С. Ширманова, Е. Н. Неверов, А. А. Владимиров [и др.] // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2025. № 3(59). С. 158–168. EDN GXUKYG.

22. Разработка системы компьютерного зрения для анализа внешнего вида творога, полученного в установке индукционного типа для термической обработки пищевого сырья / А. Н. Порохнов, П. С. Руднев, Е. В. Николаева [и др.] // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12, № 2(62). С. 112–120. EDN EBPZMH.

23. Применение микроконтроллера ATmega в управлении работой инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы / Е. Н. Неверов, Г. С. Ширманова, А. А. Владимиров, П. С. Руднев // АПК России. 2025. Т. 32, № 1. С. 71–81. DOI 10.55934/2587-8824-2025-32-1-71-81. EDN WYKVAT.

24. Обзор методов машинного обучения и компьютерного зрения в технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц / Г. С. Ширманова, Е. Н. Неверов, Е. В. Николаева, А. А. Владимиров // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 4(68). С. 92–99. DOI 10.35694/YARCX.2024.68.4.014. EDN SRLWTK.

25. Головин А.Ю., Черюканов В.В. Комплексы машин, роботизированные системы и цифровые технологии в России // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях. 2025. С. 141–145. EDN ZZHSMP.

26. Дмитриева О.С., Аржанкова Ю.В., Скопцова Т.И. Динамика морфометрических параметров хрусталика глазных яблок куриных эмбрионов (Gallus gallus domesticus) в процессе развития // Иппология и ветеринария. 2025. № 1(55). С. 41–49. DOI 10.52419/2225-1537/2025.1.41-49. EDN DZAKRY.

27. Бабик А.В., Сулейманов Ф.И. Морфогистологические изменения в репродуктивной системе эмбрионов кур под действием физических факторов в среднеплодную стадию развития // Иппология и ветеринария. 2024. № 1(51). С. 57–64. DOI 10.52419/2225-1537/2024.1.57-64. EDN HHLQME.

28. Бабик А.В., Сулейманов Ф.И. Гистоархитектоника репродуктивных органов кур в онтогенезе и при воздействии лазерного излучения и магнитного поля // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 2(47). С. 3–20. EDN DWUXTB.

29. ГОСТ Р 58521-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Птицеводство. Термины и определения. Введ. 03.09.2019. Москва: Стандартинформ, 2019. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/12/gost_r_58521-2019_natsionalnyy_standart_rossiyskoy.html.

30. Форма яиц [Электронный ресурс] // Сельскохозяйственная электронная библиотека знаний. URL: https://www.cnshb.ru/AKDiL/0062/base/RF/000559.shtm (дата обращения: 25.03.2026).

References

1. Vozdushnaya kamera yajtsa [Egg air cell] [Elektronnyj resurs] // Sel′skokhozyajstvennaya elektronnaya biblioteka znanij. URL: https://www.cnshb.ru/AKDiL/0062/base/RV/000083.shtm (data obrashcheniya: 25.03.2026).

2. Cedric O., Yuwen S., Innocent N., Tchalla K., Samwel O., Jintao W., Mingxia S. Egg volume estimation based on image processing and computer vision // Journal of Food Engineering. 2020. V. 283. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110041.

3. Zhenlong W., Hengyuan Z., Cheng F. Research on machine vision online monitoring system for egg production and quality in cage environment // Poultry Science. 2025. V. 104. № 1. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104552.

4. Sachin S., Ramesh B., Xiao Y., Lilong C. Tracking floor eggs with machine vision in cage-free hen houses // Poultry Science. 2023. V. 102. № 6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102637.

5. Bao G., Jia M., Xun Y., Cai S., Yang Q. Cracked egg recognition based on machine vision // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. V. 158. P. 159–166. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.005.

6. Zhanhong H., Ken C., Gengsheng X., Qiusen F., Yanzhu F., Huazhou C., Hongwei Y., Ziying W., Qinyong L. Early-stage fertilization detection in pigeon eggs during incubation using improved lightweight model // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. V. 215. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108422.

7. Qingxu L., Ziyan S., Wanhuai Z., Qianrui S., Qiaohua W. MobileOne-YOLO: Improving the YOLOv7 network for the detection of unfertilized duck eggs and early duck embryo development - a novel approach // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. V. 214. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108316.

8. Md. Toukir A., Md. Wadud A., Ocean M., Jason L.E., Girish C., Mohammed K. Hyperspectral image reconstruction for predicting chick embryo mortality towards advancing egg and hatchery industry // Smart Agricultural Technology. 2024. V. 9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100533.

9. Amin N., Mahmoud O., Amin T.-G. An automatic sorting system for unwashed eggs using deep learning // Journal of Food Engineering. 2020. V. 283. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110036.

10. Mota-Grajales R., Torres-Peña J.C., Camas-Anzueto J.L., Pérez-Patricio M., Grajales Coutiño R., López-Estrada F.R., Escobar-Gómez E.N., Guerra-Crespo H. Defect detection in eggshell using a vision system to ensure the incubation in poultry production // Measurement. 2019. V. 135. P. 39–46. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.059.

11. Computer vision-based automatic system for egg grading and defect detection / X. Yang, R.B. Bist, S. Subedi [et al.] // Animals. 2023. V. 13. P. 23–54. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13142354.

12. Non-destructive detection of pre-incubated chicken egg fertility using hyperspectral imaging and machine learning / A. Wadud, S. Asher, L.E. Jason [et al.] // Smart Agricultural Technology. 2025. V. 10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100857.

13. Shofan S., Rafał D. Non-destructive egg fertility detection in incubation using SVM classifier based on GLCM parameters // Procedia Computer Science. 2022. V. 207. P. 3254–3263. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.383.

14. CVAE-DF: A hybrid deep learning framework for fertilization status detection of pre incubation duck eggs based on VIS/NIR spectroscopy / D. Wang, Q. Wang, Z. Chen [et al.] // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2024. V. 320. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.saa.2024.124569.

15. Digital imaging assisted geometry of chicken eggs using Hügelschäffer's model / V. G. Narushin, M. N. Romanov, G. Lu [et al.] // Biosystems Engineering. 2020. V. 197. P. 45–55. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.008.

16. Crack detection on duck eggs using CNN / R. G. Caballero, J. R. Gucor, R. D. P. Talledo [et al.] // Procedia Computer Science. 2025. V. 257. P. 631–636. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.081.

17. Eggshell biometrics for individual egg identification based on convolutional neural networks / Z. Chen, P. He, Y. He [et al.] // Poultry Science. 2023. V. 102. № 4. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psj. 2023.102540.

18. Nakaguchi V.M., Abeyrathna R.M.R.D., Ahamed T. Development of a new grading system for quail eggs using a deep learning-based machine vision system // Computers and Electronics in Agriculture. 2024. V. 226. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag. 2024.109433.

19. Victor Massaki Nakaguchi, R.M. Rasika D. Abeyrathna, Tofael Ahamed. Development of a new grading system for quail eggs using a deep learning based machine vision system. Computers and Electronics in Agriculture. Volume 226. 2024. 109433. ISSN 0168 1699. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109433.

20. Eggshell biometrics for individual egg identification based on convolutional neural networks / Chen Zhonghao, He Pengguang, He Yefan [et al.] Poultry Science, Volume 102, Issue 4. 2023. 102540. ISSN 0032-5791. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102540.

21. Razrabotka sistemy komp′yuternogo zreniya dlya nerazrushayushchej otsenki kachestva i klassifikatsii kurinykh yaits [Development of a computer vision system for non-destructive quality assessment and classification of chicken eggs] / G.S. Shirmanova, E.N. Neverov, A.A. Vladimirov [i dr.] // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025. № 3(59). S. 158–168. EDN GXUKYG.

22. Razrabotka sistemy komp′yuternogo zreniya dlya analiza vneshnego vida tvoroga, poluchennogo v ustanovke induktsionnogo tipa dlya termicheskoj obrabotki pishchevogo syr′ya [Development of a computer vision system for analyzing the appearance of cottage cheese obtained in an induction-type installation for thermal processing of food raw materials] / A. N. Porokhnov, P. S. Rudnev, E. V. Nikolaeva [i dr.] // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2023. T. 12, № 2(62). S. 112–120. EDN EBPZMH.

23. Primenenie mikrokontrollera ATmega v upravlenii rabotoj inkubatora dlya vyvedeniya sel′skokhozyajstvennoj ptitsy [Application of the ATmega microcontroller in controlling the operation of an incubator for hatching agricultural poultry] / E. N. Neverov, G. S. Shirmanova, A. A. Vladimirov, P. S. Rudnev // APK Rossii. 2025. T. 32, № 1. S. 71–81. DOI 10.55934/2587-8824-2025-32-1-71-81. EDN WYKVAT.

24. Obzor metodov mashinnogo obucheniya i komp′yuternogo zreniya v tekhnologii inkubatsii yaits sel′skokhozyajstvennykh ptits [Review of machine learning and computer vision methods in the technology of incubation of eggs of agricultural birds] / G. S. Shirmanova, E. N. Neverov, E. V. Nikolaeva, A. A. Vladimirov // Vestnik APK Verkhnevolzh′ya. 2024. № 4(68). S. 92–99. DOI 10.35694/YARCX.2024.68.4.014. EDN SRLWTK.

25. Golovin A.Yu., Cheryukanov V.V. Kompleksy mashin, robotizirovannye sistemy i tsifrovye tekhnologii v Rossii [Machine complexes, robotic systems and digital technologies in Russia] // Innovatsionnye tekhnologii v APK, kak faktor razvitiya nauki v sovremennykh usloviyakh. 2025. S. 141–145. EDN ZZHSMP.

26. Dmitrieva O.S., Arzhankova Yu.V., Skoptsova T.I. Dinamika morfometricheskikh parametrov khrustalika glaznykh yablok kurinykh embrionov (Gallus gallus domesticus) v protsesse razvitiya [Dynamics of morphometric parameters of the lens of the eyeballs of chicken embryos (Gallus gallus domesticus) during development] // Ippologiya i veterinariya. 2025. № 1(55). S. 41–49. DOI 10.52419/2225-1537/2025.1.41-49. EDN DZAKRY.

27. Babik A.V., Sulejmanov F.I. Morfogistologicheskie izmeneniya v reproduktivnoj sisteme embrionov kur pod dejstviem fizicheskikh faktorov v sredneplodnuyu stadiyu razvitiya [Morphohistological changes in the reproductive system of chicken embryos under the influence of physical factors at the mid-fetal stage of development] // Ippologiya i veterinariya. 2024. № 1(51). S. 57–64. DOI 10.52419/2225-1537/2024.1.57-64. EDN HHLQME.

28. Babik A.V., Sulejmanov F.I. Gistoarkhitektonika reproduktivnykh organov kur v ontogeneze i pri vozdejstvii lazernogo izlucheniya i magnitnogo polya [Histoarchitecture of the reproductive organs of chickens during ontogenesis and under the influence of laser radiation and a magnetic field] // Izvestiya Velikolukskoj gosudarstvennoj sel′skokhozyajstvennoj akademii. 2024. № 2(47). S. 3–20. EDN DWUXTB.

29. GOST R 58521-2019. Natsional′nyj standart Rossijskoj Federatsii. Ptitsevodstvo. Terminy i opredeleniya [Poultry farming. Terms and definitions]. Vved. 03.09.2019. Moskva : Standartinform, 2019. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/12/gost_r_58521-2019_natsionalnyy_standart_rossiyskoy.html.

30. Forma yaits [Egg shape] [Elektronnyj resurs] // Sel′skokhozyajstvennaya elektronnaya biblioteka znanij. URL: https://www.cnshb.ru/AKDiL/0062/base/RF/000559.shtm (data obrashcheniya: 25.03.2026).

Сведения об авторах

Неверов Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000, e-mail: neverov42@mail.ru;

Руднев Павел Сергеевич, старший лаборант кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет» Минздрава России, аспирант 2 года обучения кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», e-mail: pavsergrud@yandex.ru;

Майтаков Анатолий Леонидович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления качеством, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000, e-mail: may585417@mail.ru.

Information about authors

Neverov Evgeny Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department of mechatronics and automation of technological systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, e-mail: neverov42@mail.ru;

Rudnev Pavel Sergeevich, senior laboratory assistant, department of information technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State Medical University of the Russian Ministry of Healthcare»; second-year postgraduate student, department of mechatronics and automation of technological systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, e-mail: pavsergrud@yandex.ru;

Maitakov Anatoly Leonidovich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of department of quality management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, e-mail: may585417@mail.ru.

УДК 621.825.6:621.71

А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ ШАРНИРОВ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

Аннотация. В практике эксплуатации транспортных и технологических машин наименьшей долговечностью обладают агрегаты механических трансмиссий, включающие подшипники качения. Основным функциональным параметром подшипниковых узлов является замыкающих размер в виде зазора. Применительно к подшипниковым узлам карданных передач в условиях смещения валов долговечность передач лимитирована наличием радиального, окружного и осевого зазоров. Цель – аналитическая оценка величин функционального радиального зазора в соединении «шип крестовины – игольчатый подшипник – проушина вилки». Объект исследования – подшипниковые узлы шарниров карданных передач по ОСТ 37.001.068-76. Методика аналитической оценки включает определение радиального зазора с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров исходя из геометрических соображений. При этом установлено, что в карданных подшипниковых узлах возникают начальный, посадочный и рабочий виды радиального зазора, обусловленные процессами изготовления, сборки и эксплуатации. Расчетная оценка зазоров показывает, что исходный начальный зазор G_r в процессе сборки подшипникового узла снижается и переходит в посадочный G_r', который в процессе эксплуатации незначительно увеличивается до значения рабочего G_r" зазора. Сопоставительная оценка влияния рассматриваемых факторов на изменение радиального зазора показала, что для шарниров типоразмеров I…III первоочередное влияние имеет процесс сборки, для типоразмеров IV…VIII – температурная и упругая деформации. Графическая интерпретация результатов показывает, что уровень абсолютных средних значений радиального зазора для подшипниковых узлов I…III и VI…VIII типоразмеров ниже уровня IV и V типоразмеров. Таким образом, можно прогнозировать, что для подшипниковых узлов IV и V типоразмеров уровень долговечности будет ниже. Результаты исследований показывают наличие перспектив в разработке способов минимизации радиального зазора в подшипниковых узлах.

Ключевые слова: карданная передача, шарнир, подшипниковый узел, крестовина, игольчатый подшипник, радиальный зазор.

ANALYTICAL EVALUATION OF RADIAL CLEARANCE IN BEARING UNITS OF JOINTS OF CARDAN GEARS

Abstract. In the practice of operating transport and technological machines, mechanical transmission units including rolling bearings have the least durability. The main functional parameter of bearing assemblies is closing dimension in the form of clearance. With regard to bearing units of cardan gears in conditions of shaft displacement, the durability of gears is limited by the presence of radial, circular and axial gaps. Purpose – analytical evaluation of the values of the functional radial clearance in the joint «spider spike – needle bearing – fork eye». The object of research is bearing assemblies of joints of cardan gears according to OST 37.001.068-76. Analytical evaluation method includes determination of radial clearance taking into account structural, process and operational parameters based on geometrical considerations. Note here that initial, mounting and working types of radial clearance occur in cardan bearing assemblies caused by fabrication, assembly and operation. The calculated clearance estimates shows that the initial clearance Gr during the assembly of the bearing assembly decreases and goes into the seating clearance Gr', which during operation slightly increases to the value of the working clearance Gr". A comparative assessment of the influence of the factors under consideration on the change in the radial gap showed that for hinges of standard sizes I...III, the assembly process has the first influence, for standard sizes IV...VIII – temperature and elastic deformation. Graphical interpretation of the results shows that the level of absolute average values of radial clearance for bearing assemblies of I...III and VI...VIII standard sizes is below the level of IV and V standard sizes. Thus, it can be predicted that for bearing assemblies of IV and V sizes, the durability level will be lower. The research results show that there are prospects in the development of methods for minimizing radial clearance in bearing assemblies.

Keywords: cardan drive, joint, bearing assembly, spider, needle bearing, radial clearance.

Введение. В Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года (распоряжение Правительства Российской Федерации № 1455-р от 7.07.2017 г.) основной инженерной задачей ставится разработка высокопроизводительных транспортных и технологических машин, а также технологий восстановления и поддержания их работоспособности. В основе данных разработок заложено повышение инновационного потенциала сельскохозяйственного машиностроения путем активного проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В практике эксплуатации агрегатов механических трансмиссий транспортных и технологических машин наименьшей долговечностью обладают агрегаты, включающие подшипниковые узлы, в частности коробки перемены передач, ведущие мосты, карданные передачи с шарнирами неравных угловых скоростей и др. При этом низкая долговечность подшипниковых узлов в упомянутых агрегатах обуславливается конструктивными особенностями и условиями нагружения, поэтому эксплуатация таких подшипниковых узлов с минимальным (почти нулевым) радиальным зазором обеспечивает рациональное распределение нагрузки, снижение вибрации и шума, и повышение их ресурса [1].

Основным функциональным параметром подшипниковых узлов является замыкающих размер конструктивных и кинематических размерных цепей в виде радиального, окружного и осевого зазоров, которые в процессе эксплуатации снижают эксплуатационные показатели механических агрегатов и лимитируют долговечность всей трансмиссии [2]. В трансмиссиях транспортных и технологических машин с целью передачи мощности от источника энергии к движителю или рабочим органам в условиях возникновения радиального, осевого и углового эксцентриситета между концами и осями валов агрегатов применяют карданные передачи с шарнирами неравных угловых скоростей на игольчатых подшипниках [3]. На основании обзора исследований можно утверждать, что основным фактором, снижающим долговечность шарниров карданных передач, является наличие радиального, окружного и осевого зазоров в соединениях «шип крестовины – игольчатый под-

© Пастухов А. Г., Бахарев Д. Н., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

шипник – проушина вилки», которые приводят к перекосу игольчатых роликов в контактах с шипами и стаканами подшипников [4].

Кроме того, в области исследований влияния величин функционального зазора в виде начального, посадочного и рабочего радиального зазора в подшипниках на распределение нагрузки между телами качения установлено, что увеличение радиального зазора в подшипнике приводит к ухудшению распределения рабочей нагрузки между телами качения и, следовательно, снижению его ресурса. Для рационального распределения нагрузки и реализации долговечности подшипника следует периодически, по мере нарастания радиального зазора, приводить его к минимуму или создавать натяг [5].

В этой связи целью настоящей работы является аналитическая оценка величин функционального радиального зазора в соединении «шип крестовины – игольчатый подшипник – проушина вилки» шарниров карданных передач.

Анализ последних исследований. В области долговечности подшипников качения широко известны исследования по оценке влияния радиального зазора на работоспособность подшипниковых узлов агрегатов машин по параметрам жесткости, нагруженности тел качения, силового контакта тел и дорожек качения, максимальной нагрузки на наиболее нагруженный ролик и др. [6-10]. В частности, при оценке жесткости роликовых подшипников с учетом радиального зазора установлено, что основными оценочными параметрами могут быть относительная жесткость, количество нагруженных роликов с учетом радиального зазора и смещение относительно эксцентриситета в подшипнике [6]. Кроме того, на жесткость роликового подшипника влияет схема расположения наиболее нагруженных роликов – по центру наиболее нагруженного ролика или между двумя наиболее нагруженными роликами. В этом случае оценка влияния радиального зазора на жесткость подшипника может проводиться по безразмерным параметрам жесткости и радиального зазора [7]. При оценке нагруженности и прочности подшипниковых узлов необходимы результаты аналитического определения жесткости роликовых подшипников при наличии в них радиального зазора. Предварительно исследованы распределение нагрузки по телам качения, максимальная нагрузка на ролик, перемещения в подшипниках и количество нагруженных роликов при отсутствии зазоров-натягов. Данные параметры определены при наличии зазоров в подшипнике, поэтому в дальнейшем достаточно провести сопоставительную оценку по данным параметрам в натуральном и безразмерном виде [8].

Для оценки нагруженности подшипников необходимо аналитическое решение задачи о контактном взаимодействии между дорожками и телами качения роликовых подшипников. В этом случае проводят исследования влияния радиального зазора в подшипнике на параметры силового контакта между элементами подшипника и определяют параметры нагруженности при двух схемах нагружения: при прохождении внешней силы по центру наиболее нагруженного ролика и между двумя наиболее нагруженными роликами. Результаты исследований представлены функциями зависимости параметров нагруженности подшипника от величины радиального зазора [9]. В итоге исследования влияния радиального зазора в роликовом подшипнике на его эксплуатационные параметры проводят на основе определенной зависимости максимальной нагрузки на отдельный ролик от величины зазора. В этом случае, при увеличении зазора до 50 мкм нагрузка на наиболее нагруженный ролик возрастает приблизительно в 2 раза. Данные результаты приводят к уточнению аналитических зависимостей и повышают точность прогнозирования долговечности подшипников качения [10].

Как результат упомянутых выше исследований, активно разрабатываются методики аналитического исследования радиального зазора в подшипниках машин, технические средства и технологии обеспечения работоспособности подшипниковых узлов по оценке влияния износа на долговечность, применения автоматизированной системы измерения зазоров в подшипниках и проведение диагностики подшипниковых узлов на основе применения нейронных сетей по параметрам вибрации [11-14]. Авторами на примере подшипников качения, применяемых в транспортных и технологических машинах с числом тел качения менее 15, при исследованиях для нечетной и четной схем расположения тел качения в рабочей зоне подшипника, получены аналитические выражения для радиального зазора. В этом случае подшипник с обоснованным номинальным значением радиального зазора в эксплуатации покажет повышение вероятности безотказной работы [11]. Экспериментальные исследования интенсивности износа дорожек качения от величины контактных напряжений проводили на трибометре при пяти уровнях контактных напряжениях, в результате чего получены зависимости коэффициента интенсивности изнашивания дорожки качения от уровня контактных напряжений. Учет результатов влияния проскальзывания тел качения на долговечность подшипников снижает погрешность в определении долговечности. Износ тел и дорожек качения приводит к увеличению радиального зазора, что существенно влияет на их долговечность [12]. Таким образом, следует отметить, что в результате аналитических и экспериментальных исследований получены результаты оценки влияния радиального зазора на нагруженность и долговечность подшипников качения, что активно используют для разработки автоматизированной системы измерения величины рабочего радиального зазора подшипника качения в процессе его эксплуатации. Повышенное и пониженное значения рабочего радиального зазора в процессе эксплуатации подшипника недопустимы, так как ведут к отказу. В этой связи автоматическое измерение величины рабочего радиального зазора посредством датчика вибрации на вращающемся валу, обеспечивает вибродиагностику и мониторинг состояния подшипников машины, что позволит повысить информативность диагностирования неисправностей [13].

Последующая оценка технического состояния подшипниковых узлов сталкивается с существенными массивами данных, которые необходимо анализировать с целью вынесения диагноза. В этой связи целесообразно использовать нейронные сети, которые надежно позволяют распознавать массивы радиального зазора и обнаруженные дефекты подшипников с использованием спектра виброускорения. Достоинством таких диагностических моделей, основанных на искусственных нейронных сетях, является применимость в качестве диагностических любых параметров (температуры, вибрации, зазоров и др.) и в любом количестве (без ограничений), что повышает точности диагностирования подшипников [14].

Следовательно, обзор исследований по влиянию радиальных и осевых зазоров в подшипниковых узлах на их нагруженность и долговечность с последующим применением полученных данных для разработки методик расчета, технических средств и технологий диагностирования и разработки автоматических систем технического контроля подшипниковых узлов показывает необходимость и обоснованность данных исследований. Однако в процессе исследований авторы не учитывают процесс формирования и изменения зазоров в исходной конструкции, в процессе сборки и в процессе нагружения в эксплуатации.

Материал и методы исследований. Объект исследования – подшипниковые узлы шарниров карданных передач по ОСТ 37.001.068-76. Расчетную оценку проводим с учетом их конструкций всего типоразмерного ряда, применяемого в транспортных и технологических машинах. В исследованиях применен комплексный аналитический метод на основе теорий размерных цепей, посадок с натягом и механики твердого деформируемого тела.

Результаты исследований. Сопоставительный анализ конструкций подшипниковых узлов, условий сборки и эксплуатации для всего типоразмерного ряда показал, что в соединении «шип крестовины – игольчатый подшипник – проушина вилки» существуют три вида функционального радиального зазора: начальный зазор – обусловлен исходными размерами тел и дорожек качения, посадочный зазор – характеризует изменение начального зазора после деформации деталей при сборке и рабочий зазор – при эксплуатационном нагружении [1, 5, 15].

Начальный радиальный зазор G_r определяют из геометрических соображений в радиальном направлении при установке подшипника на шип крестовины по формуле [1, 15]

$$G_r = D_2 - (2d_0 + D_0), \tag{1}$$

где D_2 – внутренний диаметр стакана подшипника, мм; d_0 – диаметр игольчатых роликов, мм; D_0 – внешний диаметр шипа крестовины, мм.

Посадочный радиальный зазор G_r' определяют из геометрических соображений в результате установки подшипника на рабочее место в отверстие проушины карданной вилки по формуле [1, 15]

$$G_r' = G_r - (\Delta D_2 + \Delta D_0), \tag{2}$$

где ΔD_2 – приращение внутреннего диаметра стакана подшипника, мм; ΔD_0 – приращение наружного диаметра шипа крестовины, мм (так как размер постоянный, принимаем $\Delta D_0=0$).

Приращение внутреннего диаметра стакана подшипника ΔD_2 за счет деформации определяют по формуле [1, 15]

$$\Delta D_2 = \frac{2p_{\max} D_2 d_{нс}^2}{E_2(D_2^2 - d_{нс}^2)}, \tag{3}$$

где p_{max} – давление при максимальном натяге посадки, МПа; $d_{нс}$ – номинальный диаметр соединения в посадке, мм; E_2 – модуль продольной упругости, МПа.

Удельное давление при максимальной натяге посадки p_{max} в соединении «игольчатый подшипник – проушина вилки» определяют по формуле [1, 15]

$$p_{\max} = \frac{N_{\max} - \gamma_ш}{d_{нс}\left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right)}, \tag{4}$$

где N_{max} – максимальный натяг посадки в соединении, мм; $\gamma_ш$ – коррекция на смятие неровности и шероховатости поверхности, мм; C_1, C_2 – коэффициенты Ламэ; E_1, E_2 – модули продольной упругости (для сталей принимаем $E_1=E_2=2\cdot10^5$ МПа).

Величину коррекции на смятие неровности и шероховатости поверхностей $\gamma_ш$ определяют по формуле [1, 15]

$$\gamma_ш \approx 5(R_{aD} + R_{ad}), \tag{5}$$

где R_{aD}, R_{ad} – параметры неровностей и шероховатости поверхностей в соединении, мкм, (принимаем R_{aD}=1,25 мкм, R_{ad}=0,32 мкм по данным конструкторской документации).

Коэффициенты Ламэ с учетом соотношения расчетных диаметров и механических свойств материалов определяют по формулам [1, 15]

$$C_1 = \frac{1+\left(\frac{d_1}{d_{нс}}\right)^2}{1-\left(\frac{d_1}{d_{нс}}\right)^2} - \nu_1;\ C_2 = \frac{1+\left(\frac{d_{нс}}{d_2}\right)^2}{1-\left(\frac{d_{нс}}{d_2}\right)^2} + \nu_2, \tag{6}$$

где $d_1=D_2$ – внутренний диаметр стакана подшипника (конструктивный), мм; d_2 – наружный размер проушины, мм (принимаем из конструктивных соображений $d_2\to\infty$); ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона (для сталей $\nu_1=\nu_2$=0,3).

Максимальный натяг посадки N_{max} в соединении определяют из геометрических соображений в виде разности внутреннего диаметра отверстия проушины и внешнего диаметра стакана на основе конструктивных размеров.

Окончательно искомый посадочный радиальный зазор G_r' определяют по формуле, получаемой на основе совместного преобразования формул (2)-(6)

$$G_r' = G_r - \frac{2D_2 d_{нс}^2}{E_2(D_2^2 - d_{нс}^2)} \times \frac{N_{\max} - 5\left(R_{aD} + R_{ad}\right)}{d_{нс}\left[\left(\frac{1+\left(d_1/d_{нс}\right)^2}{1-\left(d_1/d_{нс}\right)^2} - \nu_1\right)\frac{1}{E_1} + \frac{(1+\nu_2)}{E_2}\right]}. \tag{7}$$

Рабочий радиальный зазор G_r'' в подшипниковом узле формируется в процессе эксплуатационного нагружения с учетом установившегося температурного режима работы [1, 15]

$$G_r'' = G_r' \mp \Delta G_r + \delta_r, \tag{8}$$

где ΔG_r – приращение зазора при перепаде температуры, мм; δ_r – радиальная упругая деформация в контакте наиболее нагруженного ролика с шипом, мм. Знак «плюс-минус» в формуле показывает. что возможно как увеличение, так и уменьшение приращения зазора.

Приращение радиального зазора от перепада температур вычисляют по формуле [1, 15]

$$\Delta G_r = d_{нс}\alpha_t\left(\Delta t_d + \Delta t_D\right), \tag{9}$$

где α_t – коэффициент линейного температурного расширения материала (α_t=12,5 град$^{-1}$); $\Delta t_d = t_d - 20°C$, $\Delta t_D = t_D - 20°C$ – приращение рабочей температуры t_d≈50 °С шипа и стакана t_D≈60 °С в отличие от температуры в процессе сборки.

Радиальную упругую деформацию в процессе эксплуатационного нагружения рабочим крутящим моментом шарнира определяют по формуле [1, 15]

$$\delta_r = 4{,}05\cdot 10^{-5}\cdot\frac{Q^{0,25}}{L_W^{0,85}}, \tag{10}$$

где Q – нагрузка на наиболее нагруженный ролик игольчатого подшипника, Н.

При номинальном радиальном зазоре для роликовых подшипников максимальную нагрузку на ролик определяют по формуле [1, 15]

$$Q = \frac{5F_r}{iZ\cos\alpha}, \tag{11}$$

где F_r – радиальная нагрузка на игольчатый подшипник от крутящего момента, Н; i=1 – число рядов роликов; Z – число тел качения в ряду; α=0° – угол контакта роликов и дорожек качения.

Величину радиальной нагрузки F_r на карданный игольчатый подшипник от крутящего момента на шарнире определяют по формуле [1, 15]

$$F_r = \frac{T_{КШ}}{(H - L_W)\cos\beta}, \tag{12}$$

где $T_{КШ}$ – крутящий момент при эксплуатационном нагружении шарнира, Н·м; H – высота крестовины по торцам шипов, м; L_W – рабочая длина игольчатого ролика, м; β – угол излома шарнира в эксплуатации, град (принимаем наибольшее значение β=20°).

Окончательно величину рабочего радиального зазора G_r'' в подшипниковом узле определяют по формуле, получаем при преобразовании формул (8)-(12)

$$G_r'' = G_r' \mp d_{нс}\alpha_t\left(\Delta t_d + \Delta t_D\right) + 4{,}05\cdot 10^{-5}\cdot\frac{\left(\dfrac{5T_{КШ}}{iZ\cos\alpha(H - L_W)\cos\beta}\right)^{0,925}}{L_W^{0,85}}. \tag{13}$$

Исходные данные по подшипникам по типоразмерному ряду карданных шарниров и результаты расчета на основании формул (1), (7) и (13) представлены в таблице 1. Графическая интерпретация средних значений для видов радиального зазора представлена на рисунке.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета радиального зазора, мкм

Типоразмер / № подшипника	Z, шт.	D_W, мм	L_W, мм	Расчетный радиальный зазор *					
				Начальный G_r		Посадочный G_r'		Рабочий G_r''	
				max	min	max	min	max	min
I / 904902	22	2,4	10,0	40	0	15	-25	18	-22
II / 704902	22	2,5	12,5	49	0	30	-19	33	-16
III / 704702	29	2,0	13,8	59	-15	42	-32	46	-28
III / 704702К2	20	3,0	13,5	59	-15	30	-35	35	-30
IV / 804704	26	3,0	18,0	294	140	292	138	297	143
V / 804805	29	3,0	18,1	294	140	292	138	298	144
VI / 804907	38	3,0	18,0	103	7	101	5	107	11
VII / 804707	38	3,0	24,0	109	13	107	11	113	17
VIII / 804709	38	3,0	24,0	81	-10	79	-12	87	-4

* положительные значения показывают наличие зазора, отрицательные значения указывают на натяг

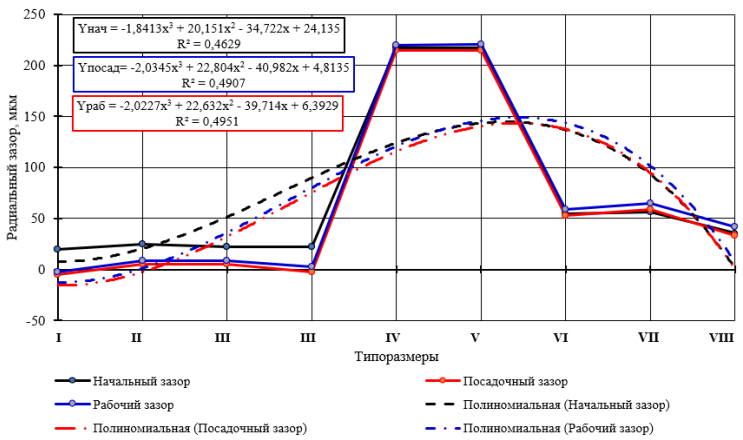


Рис. 1 – Графическая интерпретация радиального зазора и результаты аппроксимации

Анализ результатов показывает следующее:

1) приращения диаметра стакана подшипника в процессе установки его в отверстие проушины вилки с посадочным натягом привело к снижению посадочного зазора G_r' по сравнению с начальным зазором G_r;

2) под действием температурных и упругих деформаций от эксплуатационной нагрузки рабочий зазор G_r'' увеличился по сравнению с посадочным зазором G_r';

3) оценка влияния перечисленных факторов на приращение величин радиального зазора показала, что для шарниров типоразмеров I…III первоочередное влияние имеет процесс сборки, для типоразмеров IV…VIII – температурная и упругая деформации.

Вид изменения графика показывает, что уровень абсолютных значений радиального зазора для подшипниковых узлов I…III и VI…VIII типоразмеров ниже уровня IV и V типоразмеров. Анализ графиков и результатов аппроксимации полиноминальной функцией 3-й степени показывает, что при R^2=0,4629…0,4951 можно утверждать об удовлетворительной аппроксимации и слабой связи оцениваемых конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров и значений радиального зазора, т.е. имеются вопросы неопределенности влияния факторов или необходимость введения большего числа исследуемых факторов.

Выводы. Обобщая приведенные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика расчетной оценки радиального зазора в подшипниках с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов при его геометрическом формировании, реализации при сборке и эксплуатационном нагружении.

2. При прогнозировании снижения долговечности с учетом взаимосвязи с радиальным зазором подшипниковых узлов следует увеличить число учитываемых факторов.

3. Результаты исследований показывают необходимость в разработке способов минимизации радиального зазора в подшипниковых узлах путем проектирования саморегулируемых узлов, комбинирования используемых материалов деталей, применения селективной сборки, регулирования полей допусков элементов и др.

Библиография

1. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник-каталог. М. : Машиностроение, 2003. 576 с.

2. Тракторы и автомобили / В. М. Шарипов, М. К. Бирюков, Ю. В. Дементьев и др.; Под общ. ред. В. М. Шарипова. М. : Издательский дом «Спектр», 2010. 351 с.

3. Пастухов А.Г. Расчетная оценка долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственных карданных валов / А. Г. Пастухов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2023. № 2(38). С. 25–31. EDN NGKLHJ.

4. Пастухов А.Г. Комплексная аналитическая оценка работоспособности подшипниковых узлов карданных шарниров / А. Г. Пастухов, С. П. Казанцев, Д. Н. Бахарев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2024. № 4(44). С. 52–58. EDN TKBDBC.

5. Ерохин М.Н. Надежность карданных передач трансмиссий сельскохозяйственной техники в эксплуатации / М. Н. Ерохин, А. Г. Пастухов ; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Белгородская гос. с.-х. акад.». Белгород : ФГОУ ВПО БелГСХА, 2008. 160 с. EDN QKZMPL.

6. Нахатакян Ф.Г. Жесткость роликовых подшипников с учетом радиального зазора / Ф. Г. Нахатакян // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 2. С. 93–97. DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-93-97. EDN WFKIUL.

7. Влияние зазора в радиальных роликовых подшипниках на их жесткость / Ф. Г. Нахатакян, А. К. Пузакина, Д. Ф. Нахатакян, Я. П. Зенкина // Фундаментальные основы механики. 2024. № 14. С. 78–80. DOI 10.26160/2542-0127-2024-14-78-80. EDN IRUSLA.

8. Нахатакян Ф.Г. Учет радиального зазора в роликовых опорах при определении параметров нагруженности / Ф. Г. Нахатакян, Д. Ф. Нахатакян // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 2. С. 285–293. EDN YXJCYW.

9. Нахатакян Ф.Г. Влияние зазора в роликовых подшипниках на силовой контакт между его элементами / Ф. Г. Нахатакян // Труды МАИ. 2020. № 115. С. 4. DOI 10.34759/trd-2020-115-04. EDN OYDORZ.

10. Влияние радиального зазора в роликовом подшипнике на максимальную нагрузку на ролик / Ф. Г. Нахатакян, Д. Ф. Нахатакян, Я. П. Зенкина, В. Н. Зуськова // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Москва, 11–13 ноября 2025 года. Москва : Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2025. С. 239–241. EDN QDIDJU.

11. Тарасов В.Н. Аналитическое определение радиальных зазоров в подшипниках качения технологических машин / В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина, Е. В. Тарасов // Строительные и дорожные машины. 2018. № 12. С. 46–50. EDN YUKUHR.

12. Балякин В.Б. Влияние износа тел качения и беговых дорожек на долговечность подшипников качения / В. Б. Балякин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 4(126). С. 111–117. DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-4-111-117. EDN EYIXKH.

13. Автоматизированная система измерения зазоров в подшипниках качения / Е. Н. Ишметьев, Д. В. Чистяков, А. Н. Панов, Е. Э. Бодров // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2(35). С. 61–66. DOI 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-61-66. EDN ZAXHOP.

14. Диагностика подшипников качения с использованием искусственных нейронных сетей / А. И. Винокур, Г. Б. Куликов, М. В. Суслов [и др.] // Проблемы машиноведения: Материалы V Междунар. научно-техн. конф. Омск : Омский государственный технический университет, 2021. С. 315–323. DOI 10.25206/978-5-8149-3246-4-2021-315-323. EDN YHEHRW.

15. Пастухов А.Г. Повышение надежности карданных передач трансмиссий сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / Пастухов Александр Геннадиевич. Москва, 2008. 487 с. EDN QEGFAD.

References

1. Chermenskij O.N., Fedotov N.N. Podshipniki kacheniya: Spravochnik-katalog [Rolling bearings: Directory]. M. : Mashinostroenie, 2003. 576 s.

2. Traktory i avtomobili [Tractors and cars] / V. M. Sharipov, M. K. Biryukov, Yu. V. Dement'ev i dr.; Pod obshch. red. V. M. Sharipova. M. : Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. 351 s.

3. Pastukhov A.G. Raschetnaya ocenka dolgovechnosti podshipnikovyh uzlov sel'skohozyajstvennyh kardannyh valov [Calculation of the durability of bearing assemblies of agricultural cardan shafts] / A. G. Pastuhov // Innovacii v APK: problemy i perspektivy. 2023. № 2(38). S. 25–31. EDN NGKLHJ.

4. Pastukhov A.G. Kompleksnaya analiticheskaya ocenka rabotosposobnosti podshipnikovyh uzlov kardannyh sharnirov [Comprehensive analytical assessment of the performance of bearing assemblies of cardan joints] / A. G. Pastuhov, S. P. Kazancev, D. N. Baharev // Innovacii v APK: problemy i perspektivy. 2024. № 4(44). S. 52–58. EDN TKBDBC.

5. Erokhin M.N. Nadezhnost' kardannyh peredach transmissij sel'skohozyajstvennoj tehniki v ehkspluatacii [Reliability of drivetrain transmissions of agricultural machinery in operation] / M. N. Erokhin, A. G. Pastukhov ; M-vo sel'skogo hoz-va Rossijskoj Federacii, Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya «Belgorodskaya gos. s.-h. akad.». Belgorod : FGOU VPO BelGSHA, 2008. 160 s. EDN QKZMPL.

6. Nahatakyan F.G. Zhestkost' rolikovyh podshipnikov s uchetom radial'nogo zazora [Rigidity of roller bearings taking into account the radial gap] / F. G. Nahatakyan // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2017. T. 20, № 2. S. 93–97. DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-93-97. EDN WFKIUL.

7. Vliyanie zazora v radial'nyh rolikovyh podshipnikah na ih zhestkost' [The effect of the gap in radial roller bearings on their rigidity] / F. G. Nahatakyan, A. K. Puzakina, D. F. Nahatakyan, Ya. P. Zenkina // Fundamental'nye osnovy mehaniki. 2024. № 14. S. 78–80. DOI 10.26160/2542-0127-2024-14-78-80. EDN IRUSLA.

8. Nahatakyan F.G. Uchet radial'nogo zazora v rolikovyh oporah pri opredelenii parametrov nagruzhennosti [Taking into account the radial gap in roller supports when determining loading parameters] / F. G. Nahatakyan, D. F. Nahatakyan // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2018. № 2. S. 285–293. EDN YXJCYW.

9. Nahatakyan F.G. Vliyanie zazora v rolikovyh podshipnikah na silovoj kontakt mezhdu ego ehlementami [The influence of the gap in roller bearings on the power contact between its elements] / F. G. Nahatakyan // Trudy MAI. 2020. № 115. S. 4. DOI 10.34759/trd-2020-115-04. EDN OYDORZ.

10. Vliyanie radial'nogo zazora v rolikovom podshipnike na maksimal'nuyu nagruzku na rolik [The effect of the radial gap in the roller bearing on the maximum load on the roller] / F. G. Nahatakyan, D. F. Nahatakyan, Ya. P. Zenkina, V. N. Zus'kova // Fundamental'nye issledovaniya i innovacionnye tehnologii v mashinostroenii : Nauch. Tr. IX Mezhdun. Nauch. Konf. Moskva : Institut mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN, 2025. S. 239–241. EDN QDIDJU.

11. Tarasov V.N. Analiticheskoe opredelenie radial'nyh zazorov v podshipnikah kacheniya tehnologicheskih mashin [Analytical determination of radial clearances in rolling bearings of technological machines] / V. N. Tarasov, I. V. Boyarkina, E. V. Tarasov // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2018. № 12. S. 46–50. EDN YUKUHR.

12. Balyakin V.B. Vliyanie iznosa tel kacheniya i begovyh dorozhek na dolgovechnost' podshipnikov kacheniya [The effect of wear of rolling bodies and treadmills on the durability of rolling bearings] / V. B. Balyakin // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2025. T. 27, № 4(126). S. 111–117. DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-4-111-117. EDN EYIXKH.

13. Avtomatizirovannaya sistema izmereniya zazorov v podshipnikah kacheniya [Automated system for measuring clearances in rolling bearings] / E. N. Ishmet'ev, D. V. Chistyakov, A. N. Panov, E. Eh. Bodrov // Ehlektrotehnicheskie sistemy i kompleksy. 2017. № 2(35). S. 61–66. DOI 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-61-66. EDN ZAXHOP.

14. Diagnostika podshipnikov kacheniya s ispol'zovaniem iskusstvennyh nejronnyh setej [Diagnostics of rolling bearings using artificial neural networks] / A. I. Vinokur, G. B. Kulikov, M. V. Suslov [i dr.] // Problemy mashinovedeniya: Materialy V Mezhdun. Nauchno-tehn. Konf. Omsk : Omskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet, 2021. S. 315–323. DOI 10.25206/978-5-8149-3246-4-2021-315-323. EDN YHEHRW.

15. Pastuhov A.G. Povyshenie nadezhnosti kardannyh peredach transmissij sel'skohozyajstvennoj tehniki [Improving the reliability of cardan transmissions of agricultural machinery] : special'nost' 05.20.03 «Tehnologii i sredstva tehnicheskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozyajstve» : diss. na soisk. Uch. Step. D-ra Then. Nauk / Pastuhov Aleksandr Gennadievich. Moskva, 2008. 487 s. EDN QEGFAD.

Сведения об авторах

Пастухов Александр Геннадиевич, доктор технических наук, профессор, профессор инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +7(4722) 39-23-90, e-mail: pastuhov_ag@belgau.ru;

Бахарев Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, ФГБОУ ВО Луганский ГУ им. В. Даля, квартал Молодежный, д. 20А, г. Луганск, Луганская народная республика, Россия, 291034, тел. +7 (919) 431-76-21, e-mail: baharevdn_82@mail.ru.

Information about authors

Pastukhov Alexander Gennadievich, doctor 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, Maiskiy, Belgorod m. d., Belgorod region, Russia, 308503, tel. +7(4722) 39-23-90, e-mail: pastuhov_ag@belgau.ru;

Bakharev Dmitriy Nikolayevich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of automobile transport, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State University named after V. Dal», Molodezhny quarter, 20A, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia, 291034, tel. +7 (919) 431-76-21, e-mail: bahare-vdn_82@mail.ru.

УДК 664.8.037.5: 537.337

А.М. Попов, Г.Б. Узунов, К.Б. Плотников, И.Б. Плотников, А.С. Бузаков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЯГОДНЫХ СОКОВ ПРИ ОМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ В ПРОЦЕССЕ ИХ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ

Аннотация. В последние годы наблюдается тенденция к расширению ассортимента сухих порошкообразных концентратов для напитков и пищевых продуктов, включая быстрорастворимые кисели, соки и завтраки с добавлением ягод. Однако традиционные технологии вакуум-выпаривания с кондуктивным нагревом имеют существенные недостатки: пригорание сухих веществ к греющим поверхностям, ухудшение органолептических показателей готовой продукции. Одним из перспективных альтернативных способов является омический (джоулев) нагрев, при котором электрическая энергия преобразуется в тепло непосредственно в самом продукте, обеспечивая равномерный объемный нагрев. Это позволяет значительно сократить время тепловой обработки и снизить термическую деградацию биологически активных компонентов. С целью определения электропроводности ягодных соков (черника, голубика, облепиха, черная смородина, арония) была проведена серия экспериментов в лабораторной вакуум-выпарной установке с вынесенной греющей камерой. В ходе исследований установлено, что использование омического нагрева позволяет сократить время выпаривания в 5 раз по сравнению с традиционным методом, а коэффициент полезного действия установки достигает 95…99 %. Определено, что удельная электропроводность ягодных соков находится в интервале от 1,7 до 40 $Ом^{-1.}$ $м^{-1}$, что делает их пригодными для прямого электронагрева. Выявлена аппроксимированная линейная зависимость электропроводности от температуры и концентрации сухих веществ. При повышении температуры до 70 °С проводимость возрастает за счет снижения вязкости и увеличения подвижности ионов. Результаты исследования подтверждают перспективность применения омического нагрева в вакуум-выпарных аппаратах для производства высококачественных ягодных концентратов с сохранением нативного аромата и вкуса. Полученные данные могут быть использованы при проектировании промышленных установок для концентрирования соков.

Ключевые слова: омический нагрев, вакуум-выпаривание, концентрирование соков, ягодные соки, электропроводность, сухие вещества, органолептическая оценка.

STUDY OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF BERRY JUICES UNDER OHMIC HEATING DURING CONCENTRATION

Abstract. In recent years, there has been a trend toward expanding the range of dry powdered concentrates for beverages and food products, including instant kissels, juices, and breakfast cereals with added berries. However, traditional vacuum evaporation technologies with conductive heating have significant drawbacks: dry solids stick to the heating surfaces, degrading the organoleptic properties of the finished product. One promising alternative is ohmic (Joule) heating, which converts electrical energy into heat directly within the product itself, ensuring uniform volumetric heating. This significantly reduces cooking time and minimizes thermal degradation of biologically active components. To determine the electrical conductivity of berry juices (bilberry, blueberry, sea buckthorn, black currant, and chokeberry), a series of experiments were conducted in a laboratory vacuum evaporation system with an external heating chamber. The study found that using ohmic heating reduces evaporation time by a factor of 5 compared to traditional methods, with system efficiency reaching 95–99 %. The specific electrical conductivity of berry juices was determined to range from 1.7 to 40 ohm^{-1} m^{-1}, making them suitable for direct electrical heating. An approximate linear relationship between electrical conductivity and temperature and dry matter concentration was found. As the temperature increased to 70 °C, conductivity increased due to decreased viscosity and increased ion mobility. The study results confirm the potential of using ohmic heating in vacuum evaporators for the production of high-quality berry concentrates while preserving their native aroma and flavor. The data obtained can be used in the design of industrial juice concentration systems.

Keywords: ohmic heating, vacuum evaporation, juice concentration, berry juices, electrical conductivity, dry matter, organoleptic evaluation.

Введение. Современный этап развития пищевой промышленности характеризуется наращиванием объемов производства, технологическим обновлением и расширением ассортиментного ряда концентратов. Особое внимание уделяется сухим порошкообразным смесям для напитков и иных продуктов питания, которые обладают способностью к быстрому растворению или восстановлению. Анализ существующих способов изготовления сухих порошкообразных концентратов, в том числе агломерированных в гранулы, показывает, что в их основе лежит использование высококонцентрированного сока. Данный продукт получают методом выпаривания в вакуумных аппаратах, поддерживая температуру на уровне не выше 55 °С. Указанный температурный режим необходим для предотвращения разрушения биологически активных компонентов ягодного сырья [1].

Период сбора урожая очень ограничен, в Сибири это максимум 1 месяц, поэтому для обеспечения технологического процесса производства сухих гранулированных киселей, соков, завтраков в состав которых входит ягода, ее перерабатывают в концентрат с содержанием сухих веществ 70 %.

Несмотря на эффективность традиционных технологий, использующих кондуктивный нагрев с точки зрения микробной безопасности, он часто приводит к ухудшению сенсорных и питательных свойств пищевых продуктов. Появляется необходимость в последующем обогащении, но трудно при этом сохранить сенсорные характеристики, такие как аромат, вкус, текстура, цвет. При этом общепринятые методы нагревания пищевых продуктов требуют сначала сгенерировать тепловую энергию, а затем уже передать пищевому продукту. Эта передача тепла обеспечивается теплопроводностью, конвекцией или излучением. При этом для жидких сред для ускорения процесса прогрева применяется перемешивание. Следует также отметить, что при этом, если в жидкости присутствуют крупные куски инородных продуктов, то процесс прогрева замедляется и возможен их перегрев, который вызывает разрушение внешней части этих частиц [2].

© Попов А. М., Узунов Г. Б., Плотников К. Б., Плотников И. Б., Бузаков А. С., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Высокое концентрирование соков сопряжено с появлением ощутимых недостатков, связанных с пригоранием сухого вещества ягод к греющим поверхностям выпарных аппаратов. Требуются новые инновационные технологии, способствующие решению этой проблемы. Одним из таких методов, обеспечивающим равномерный объемный нагрев продукта на всем протяжении процесса концентрирования и, получившим за последние годы интенсивное развитие за рубежом, является омический (джоулев) нагрев. Процесс омического нагрева – это метод, при котором электрическая энергия преобразуется в тепло непосредственно в продукте.

Применение выпарных аппаратов с вынесенной греющей камерой с омическим нагревом позволяет решить эту проблему.

Единственным препятствием для осуществления такого нагрева является обязательное наличие электропроводности концентрируемого сока. Джоулев нагрев эффективен и результативен для материалов с электропроводностью от 0,01 до 10 $Ом^{-1}$ [1]. Такой вид нагрева наиболее широко применяется в пищевой промышленности, в том числе для инактивации болезнетворных микроорганизмов, ферментов и выборочных не желательных соединений из пищи.

Омический нагрев известен с 19 века, когда были выданы патенты на процесс нагрева электрическим током определенных материалов. В начале 20 века омический нагрев стали использовать для пастеризации молока [3], бланширования картофеля для предотвращения ферментативного предотвращения изменения цвета [4], приготовления сэндвичей [5]. Дальнейшее распространение было приостановлено из-за отсутствия надежных изоляционных материалов и подходящих электродов.

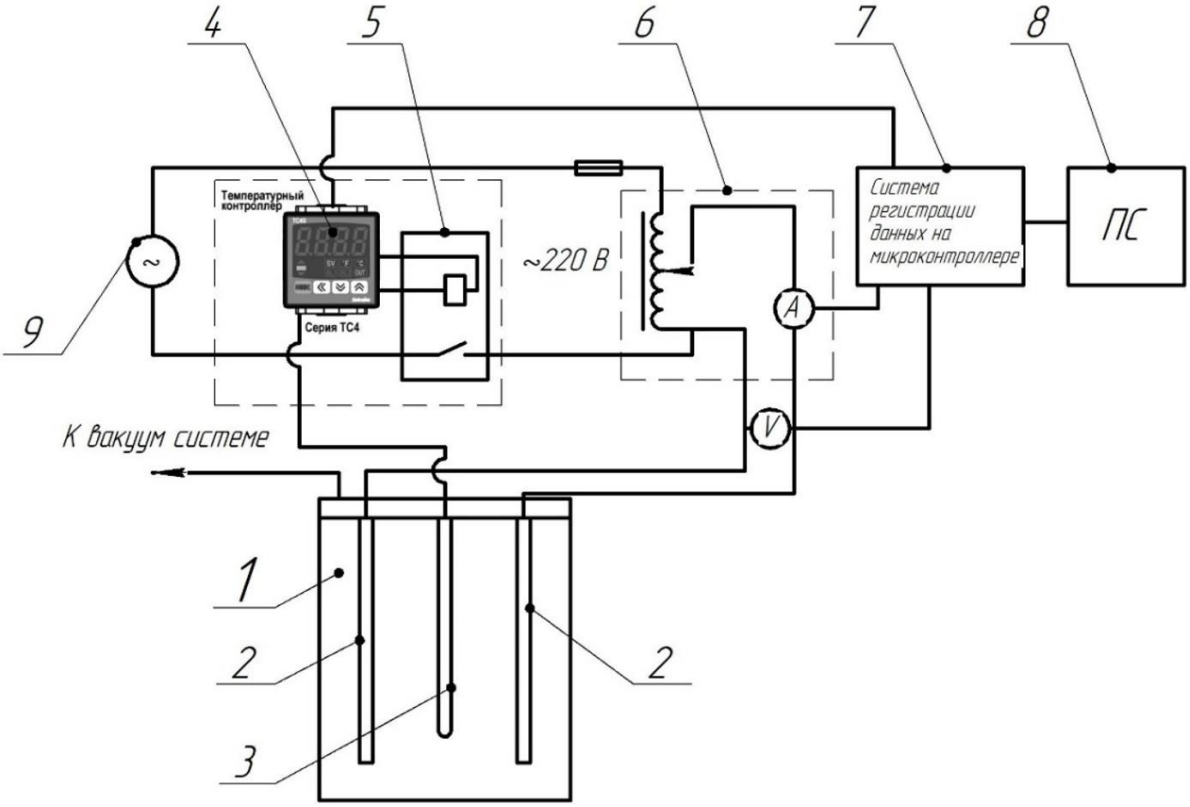
Все изменилось в последние десятилетия. Благодаря усовершенствованию и появлению новых материалов стали появляться усовершенствованные конструкции установок омического нагрева [6-9].

При всем многообразии появившихся систем и конструкций при концентрировании соков, выпарные аппараты, использующие омический нагрев в вакууме, не использовались. Имеются публикации о результатах лабораторных исследований по выпариванию вишневого сока до 65 % сухих веществ [5]. Отмечается высокий КПД процесса – 98 %.

Цель исследований – совершенствование технологии концентрирования соков с применением омического нагрева.

Задача – определить зависимость электропроводности перерабатываемого продукта от различных варьируемых параметров процесса.

Объекты и методы исследования. В нашем исследовании предложен вариант вакуум выпарного аппарата с вынесенной камерой (рис. 1), который обладает рядом достоинств: отсутствие поверхностей нагрева, компактность и простота конструкций, гибкость регулирования теплового режима при равномерном нагреве. Как показывает эксперимент, КПД таких аппаратов достигает 95…99 %, т.к. имеют место только потери тепла в окружающую среду. Греющая камера в таких аппаратах выполнена в виде установленных по оси в чередующемся порядке трубчатых электродов и изоляторов. Внутренняя поверхность этих аппаратов футеруется диэлектрическим и антикоррозионным материалом, например, фторопластом, что полностью исключает загрязнения раствора продуктами коррозии. Использование при вакуумировании пластмассовых емкостей исключается, в основном из-за опасности схлопывания при вакуумировании. К достоинствам таких аппаратов следует отнести то, что поверхность электродов таких выпарных аппаратов практически не подвержена инкрустации, что весьма важно при упаривании растворов, склонных к кристаллизации.



1 – аппарат омического нагрева; 2 – электроды; 3 – термопара; 4 – температурный контроллер; 5 – реле; 7 – система регистрации данных; 8 – персональный компьютер; 9 – источник питания

Рис. 1 – Схема экспериментальной установки

В лабораторной установке камера из легированной стали, обеспечивающая вакуум до 650…710 мм рт. ст., в которую устанавливается пластмассовая емкость, с закрепленными внутри по бокам электродами из титана, объемом 3000 мл. Наш анализ показал, что использование электродов из нержавеющей стали, как правило не лишено недостатков, связанных с коррозией и высвобождением ионов металлов в пищевые продукты. В качестве объектов исследования использовались соки черничный, голубичный, облепиховый, черносмородиновый, арониевый. Электроэнергия подавалась из сети переменного тока 50 Гц через автотрансформатор с различными градиентами напряжения – 0,9; 1,2; 1,5 В/мм. Обратная связь для управления процессом нагрева и поддержанием фиксируемой температуры в емкости – 50, 60, 70 °С обеспечивалась через регулятор температуры.

Соки для исследования получали протиркой на протирочной машине после медленной заморозки до температуры -10 °С и разморозки в течение 3 часов до температуры ±1 °С через решетку диаметром отверстий 0,75 мм. Выход сока с мякотью составил 91 % для черники и голубики, 89 % – для облепихи и 86 % – для аронии. В отходах оказались в основном семена и плодоножки. Медленная заморозка за счет разрастания кристаллов воды позволила разорвать клетки ягоды, что обеспечило хорошую отдачу сока.

Ключевым параметром, определяющим эффективность омического нагрева, является удельная электропроводность сока *k* (размерность в системе СИ - $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$). Именно она показывает, насколько хорошо продукт проводит электрический ток. Для успешного применения джоулева нагрева удельная электропроводность должна находиться в диапазоне, достаточном для генерации тепла, но не приводящем к электрическому пробою. В ходе эксперимента электропроводность измерялась косвенно, по значениям силы тока и напряжения на электродах при фиксированном расстоянии между ними, с последующим пересчетом на удельные значения.

Проанализировав известный из литературных источников [6] химический состав соков, было сделано предположение, что соки могут быть рассмотрены, как объект пригодный для прямого электронагрева.

Для сравнения были взяты концентраты соков облепихи, красной рябины и яблока с концентрацией 10 и 50 % с.в., ранее полученные в вакуум-выпарной установке с нагревом перегретым паром при температуре 55 °С. Органолептическую оценку проводили с соками, полученными на установке с омическим нагревом при тех же температурах. Отличие состояло лишь в том, что при омическом нагреве время нагрева уменьшилось в 5 раз. Результаты тестирования показали, что эксперты смогли отличить свежие образцы от выпаренных традиционным способом, а также от образцов, подвергнутых традиционному и омическому нагреву. Однако участники дискуссии не смогли отличить свежие образцы от образцов, подвергнутых омическому нагреву, поскольку они имели сходный уровень вкусовых добавок.

Результаты этого исследования показывают, что непрерывный омический нагрев может быть использован для концентрирования соков, сохраняя при этом вкус и приятные ощущения свежевыжатого сока. Технология омического нагревания столь же эффективна при необходимой микробиологической и ферментативной инактивации, как и обычная пастеризация, но сохраняет вкусовые качества, присущие нативному соку. В таблице 1 приведены параметры омического нагрева соков. На рисунках 2–7 представлены результаты исследования электропроводности от различных варьируемых параметров процесса.

Таблица 1 – Изменения напряжения и тока во время омической обработки

Время (мин)	Напряжения (В)	Ток (мА)	Температура (^{0}C)
0	18,04	72	25
2	18,01	72	51
4	18,08	73	77
6	18,12	74	90

Измерение электропроводности термостатированных образцов проводилось при температуре от +20 до +70 °С.

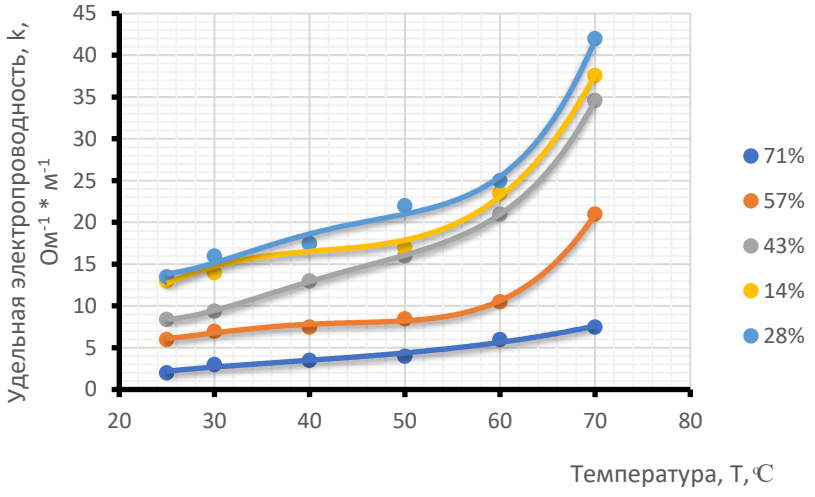


Рис. 2 – Зависимость удельной электропроводности от температуры сока рябины красной

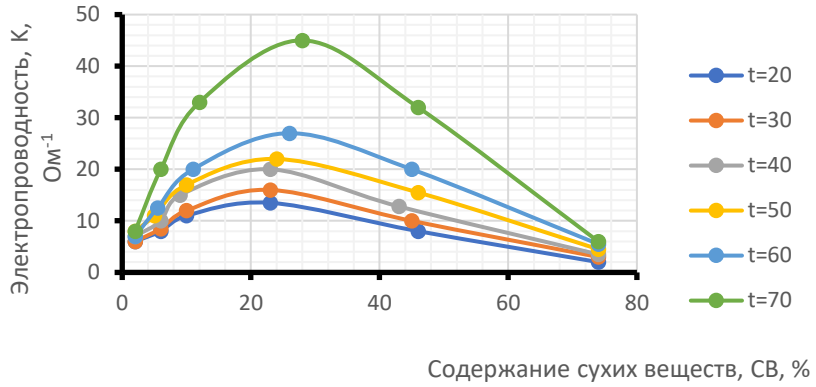


Рис. 3 – Зависимость электропроводности от концентрации сока рябины красной

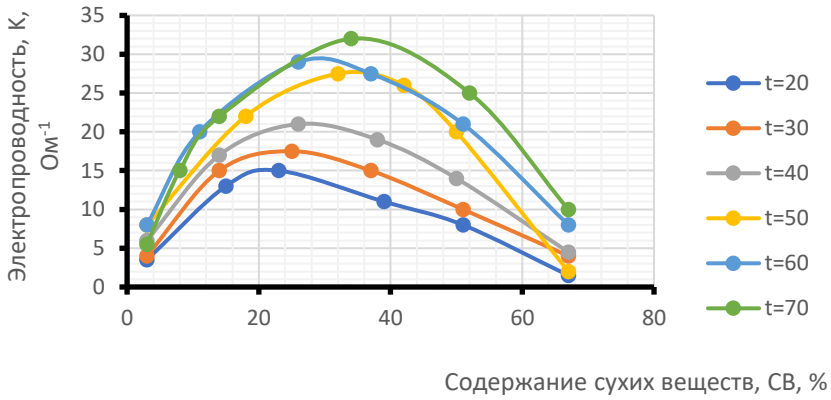


Рис. 4 – Зависимость электропроводности от концентрации облепихового сока

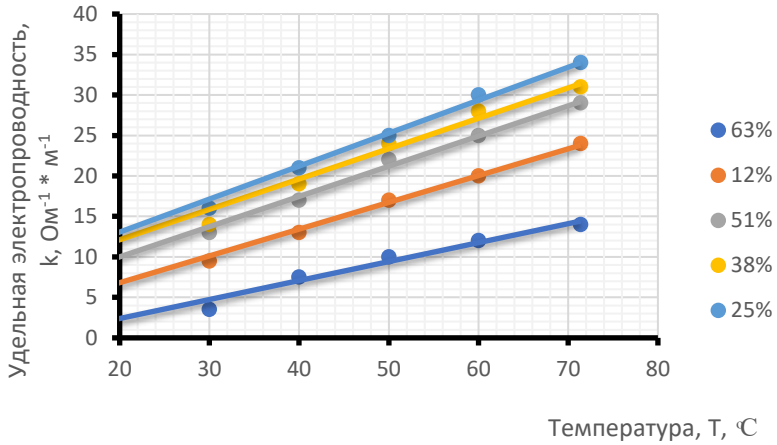


Рис. 5 – Зависимость электропроводности от температуры облепихового сока

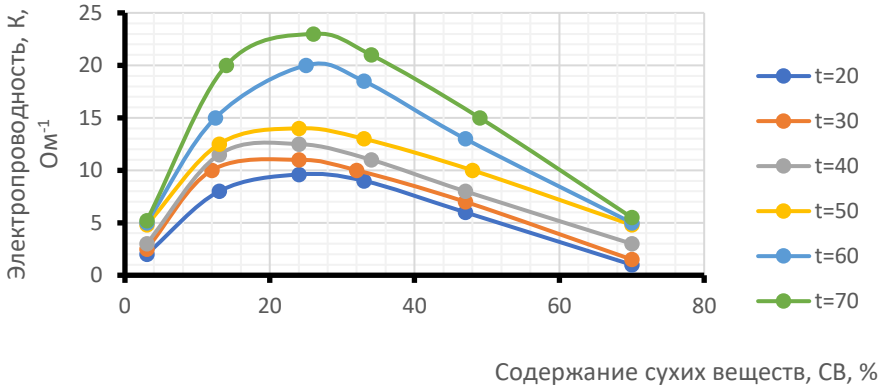


Рис. 6 – Зависимость электропроводности от концентрации яблочного сока

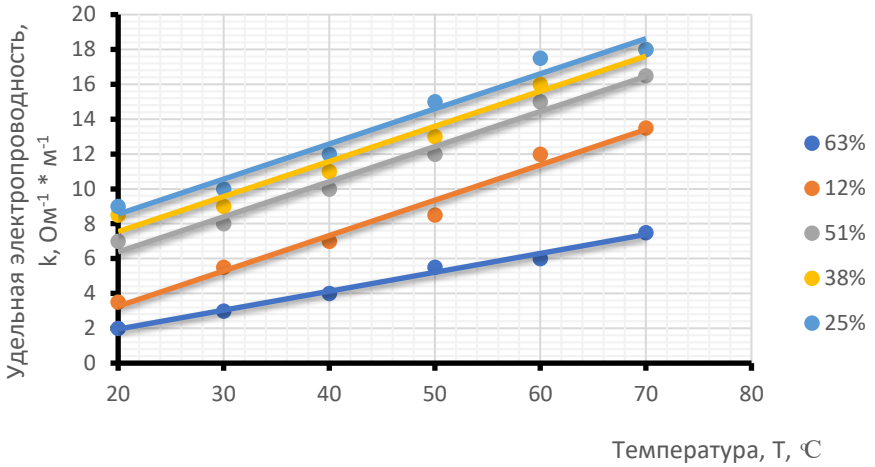


Рис. 7 – Зависимость электропроводности от температуры яблочного сока

Обсуждение результатов. Омический нагрев – это быстрая и равномерная обработка для повышения температуры среды. Доказано, что такой быстрый нагрев снижает степень термического воздействия на пищевые продукты, делая их вкус более насыщенным, что подтверждается в работах [2, 10, 11]. Увеличение или уменьшение приложенного напряжения с почти мгновенным результатом позволяет легко управлять способом нагрева. В отличие от традиционного кондуктивного нагрева, при омическом нагреве тепло генерируется непосредственно внутри продукта, что исключает перегрев пристенных слоев и связанное с ним пригорание сухих веществ [12-14]. На распределение температуры внутри среды влияют плотность и удельная теплоемкость (мера тепловой энергии, необходимой для повышения температуры единичного количества вещества на определенный температурный интервал) продукта.

Органолептический анализ вкусовых качеств концентрированных соков при традиционном выпаривании и выпаривании омическим нагревом по сравнении с нативными соками показал несомненные преимущества омического концентрирования.

Экспериментально подтверждено, что исследуемые ягодные соки характеризуются удельной электропроводностью в интервале от 1,7 до 40 $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$. Данный диапазон является оптимальным для реализации омического нагрева, поскольку обеспечивает эффективное преобразование электрической энергии в тепловую без риска локальных перегревов и электрохимической коррозии электродов. Это, в свою очередь, подтверждает техническую возможность применения выпарных аппаратов с вынесенной греющей камерой для концентрирования соков в вакууме. Поскольку удельная электрорпроводность является функцией как температуры, так и содержания сухих веществ, ее непрерывное измерение позволяет автоматически регулировать параметры процесса и определять момент достижения требуемой степени концентрирования без отбора проб.

Наличие экстремумов на рисунках 3, 4, 6 показывает, что на начальных этапах концентрирования скорость движения ионов мало зависит от вязкости, и удельная электропроводность растет прямо пропорционально числу ионов; при дальнейшем упаривании (выше 40…50 % сухих веществ) усиливающееся межионное взаимодействие и резкий рост вязкости начинают снижать подвижность ионов, что приводит к падению проводимости.

Важно отметить различный характер температурных зависимостей на рисунках 2, 5 и 7. На рисунке 2 представлена зависимость для сока рябины при фиксированной начальной концентрации (нативный сок), где электропроводность монотонно возрастает с температурой исключительно за счет снижения вязкости и увеличения подвижности ионов. В то же время на рисунках 5 и 7 показаны аналогичные кривые, но для соков облепихи и яблока при разных степенях концентрирования. При низких концентрациях (10…20 %) рост проводимости с температурой выражен сильнее, тогда как для высококонцентрированных образцов (50 %) эта зависимость становится менее крутой из-за доминирующего влияния структурной вязкости и ассоциации ионов. Во всех случаях в исследованном диапазоне +20…+70 °С наблюдается аппроксимированная линейная зависимость, что упрощает прогнозирование параметров нагрева.

Проводимость для растворов соков, взятых при температуре +70 °С, является наибольшей, что вызвано увеличением скорости движения ионов за счет понижения вязкости раствора и уменьшения сольватированности ионов.

Аналогично росту проводимости растворов соков при +70 °С объясняется рост проводимости растворов соков при повышении температуры на рисунках 2, 5, 7. Везде наблюдается аппроксимированная линейная зависимость величины проводимости от температуры раствора в диапазоне +20…+70 °С. Полученные результаты согласуются с современными тенденциями в области омического нагрева [15-16].

Выводы. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1) Установлено, что омический нагрев является эффективным и перспективным методом концентрирования ягодных соков в вакуумных выпарных аппаратах;

2) экспериментально подтверждено, что удельная электропроводность исследованных соков (черника, голубика, облепиха, черная смородина, арония) находится в диапазоне 1,7…40 $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$, что полностью удовлетворяет требованиям для реализации прямого электронагрева;

3) выявлены аппроксимированные линейные зависимости электропроводности от температуры и концентрации сухих веществ, что позволяет прогнозировать поведение продукта в процессе упаривания и использовать электропроводность как контрольный параметр для определения степени концентрирования;

4) показано, что при повышении температуры до +70 °С электропроводность возрастает за счет снижения вязкости и увеличения подвижности ионов, а при достижении определенных концентраций наблюдается экстремальный характер зависимостей, обусловленный усилением межионного взаимодействия;

5) органолептическая оценка подтвердила, что омический нагрев позволяет сохранить нативные вкусоароматиче-

ские характеристики соков в отличие от традиционного кондуктивного нагрева;

6) сокращение времени выпаривания в 5 раз и высокий КПД установки 95…99 % свидетельствуют о значительной энергетической и экономической эффективности предложенной технологии;

7) полученные результаты могут служить основой для разработки промышленных вакуум-выпарных аппаратов с омическим нагревом и для оптимизации режимов переработки ягодного сырья с целью получения высококачественных концентратов с максимальным сохранением биологически активных веществ.

Библиография

1. Alkanan Z.T., Altemimi A.B., Al-Hilphy A.R.S., Cacciola F., Ibrahim S.A. Application and Effects of Ohmic-Vacuum Combination Heating on the Quality Factors of Tomato Paste // Foods. 2021. V. 10. № 12. P. 2920. DOI: 10.3390/foods10122920.

2. Aurina K., Sari A. Ohmic Heating: A Review and Application in Food Industry // Advances in Biological Sciences Research. 2022. V. 19. P. 107–113. DOI: 10.2991/absr.k.220305.016.

3. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Использование технологии омического нагрева в процессе переработки плодов и овощей. Обзор предметного поля // Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 1. С. 59–70. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.

4. Попов А.М., Тихонов Н.В., Тихонова И.Н. Исследование технологических процессов для концентрирования и стерилизации соков методом прямого нагрева // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 1(28). С. 81–87.

5. Попов А.М., Турова Н.Н., Стабровская Е.И., Мамонтов А.С. Закономерности концентрирования творожной сыворотки методом прямого нагрева // Фундаментальные исследования. 2015. № 4. С. 125–129.

6. Barron-Garcia O.Y., Nava-Alvarez B., Gaytan-Martinez M., Gonzalez-Jasso E., Moralez-Sanchez E. Ohmic heating blanching of Agaricus bisporus mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2022. V. 80. P. 103105. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.103105.

7. Sagita D., Darmajana D.A., Hidayat D.D., Novrinaldi, Sitorus A. Design and performance of ohmic-based fermentor model for controlling fermentation process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 542. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/542/1/012033.

8. Sabanci S., Icier F. Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice // Journal of Food Engineering. 2017. V. 212. P. 262–270. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.010.

9. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий в производстве ферментированных продуктов // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 5. С. 5–13. DOI: 10.17513/srts.1446.

10. Talha M., Khalid S., Maan A.A., Tanveer N., Khan M.K.I., Asif M., Sarwar A. Ohmic assisted extraction: a sustainable and environment friendly approach to substitute conventional extraction methods // Food Reviews International. 2024. P. 1–22. DOI: 10.1080/87559129.2024.2366841.

11. Pereira R.N., Rodrigues R.M., Machado L., Ferreira S., Castro J., Villa C., Barreiros M.P., Mafra I., Teixeira H.A., Vicente A.A. Influence of ohmic heating on the structural and immunoreactive properties of soybean proteins // LWT. 2021. V. 148. P. 111710. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111710.

12. Fadavi A., Salari S. Ohmic Heating of Lemon and Grapefruit Juices Under Vacuum Pressure – Comparison of Electrical Conductivity and Heating Rate // Journal of Food Science. 2019. V. 84. № 10. P. 2868–2875. DOI: 10.1111/1750-3841.14802.

13. Sabanci S., Icier F. Evaluation of an ohmic assisted vacuum evaporation process for orange juice pulp // Food and Bioproducts Processing. 2022. V. 131. P. 156–163. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.09.008.

14. Sereechantarerk C., Hongsprabhas P., Chanput W., Kamonpatana P. Effects of ohmic heating on structural and physicochemical changes of whey proteins // Agriculture and Natural Resources. 2021. V. 55. № 3. P. 464–472.

15. Miranda C.G., Rodrigues R.M., Pereira R.N., Speranza P., Kurozawa L.E., Vicente A.A., Sato A.C.K. Influence of ohmic heating on lentil protein structure and protein-pectin interactions // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2023. V. 87. P. 103413. DOI: 10.1016/j.ifset.2023.103413.

16. Darvishi H., Mohammadi P., Fadavi A., Koushesh-Saba M., Behroozi-Khazaei N. Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic-vacuum heating // Food Chemistry. 2019. V. 289. P. 292–298. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.03.083.

References

1. Alkanan Z.T., Altemimi A.B., Al-Hilphy A.R.S., Cacciola F., Ibrahim S.A. Application and Effects of Ohmic-Vacuum Combination Heating on the Quality Factors of Tomato Paste // Foods. 2021. V. 10. № 12. P. 2920. DOI: 10.3390/foods10122920.

2. Aurina K., Sari A. Ohmic Heating: A Review and Application in Food Industry // Advances in Biological Sciences Research. 2022. V. 19. P. 107–113. DOI: 10.2991/absr.k.220305.016.

3. Burak L.Ch., Sapach A.N. Ispol'zovanie tekhnologii omicheskogo nagreva v protsesse pererabotki plodov i ovoshchey. Obzor predmetnogo polya [Use of ohmic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Subject field overview] // Pishchevye sistemy. 2024. T. 7. № 1. S. 59–70. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.

4. Popov A.M., Tikhonov N.V., Tikhonova I.N. Issledovanie tekhnologicheskikh protsessov dlya kontsentrirovaniya i sterilizatsii sokov metodom pryamogo nagreva [Study of technological processes for concentrating and sterilizing juices by direct heating] // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2013. № 1(28). S. 81–87.

5. Popov A.M., Turova N.N., Stabrovskaya E.I., Mamontov A.S. Zakonomernosti kontsentrirovaniya tvorozhnoy syvorotki metodom pryamogo nagreva [Regularities of curd serum concentration by direct heating] // Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 4. S. 125–129.

6. Barron-Garcia O.Y., Nava-Alvarez B., Gaytan-Martinez M., Gonzalez-Jasso E., Moralez-Sanchez E. Ohmic heating blanching of Agaricus bisporus mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2022. V. 80. P. 103105. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.103105.

7. Sagita D., Darmajana D.A., Hidayat D.D., Novrinaldi, Sitorus A. Design and performance of ohmic-based fermentor model for controlling fermentation process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 542. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/542/1/012033.

8. Sabanci S., Icier F. Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice // Journal of Food Engineering. 2017. V. 212. P. 262–270. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.010.

9. Burak L.Ch, Ispol'zovanie sovremennykh tekhnologiy v proizvodstve fermentirovannykh produktov [Use of modern technologies in the production of fermented products] // Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki. 2023. № 5. S. 5–13. DOI: 10.17513/srts.1446.

10. Talha M., Khalid S., Maan A.A., Tanveer N., Khan M.K.I., Asif M., Sarwar A. Ohmic assisted extraction: a sustainable and environment friendly approach to substitute conventional extraction methods // Food Reviews International. 2024. P. 1–22. DOI: 10.1080/87559129.2024.2366841.

11. Pereira R.N., Rodrigues R.M., Machado L., Ferreira S., Castro J., Villa C., Barreiros M.P., Mafra I., Teixeira H.A., Vicente A.A. Influence of ohmic heating on the structural and immunoreactive properties of soybean proteins // LWT. 2021. V. 148. P. 111710. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111710.

12. Fadavi A., Salari S. Ohmic Heating of Lemon and Grapefruit Juices Under Vacuum Pressure – Comparison of Electrical Conductivity and Heating Rate // Journal of Food Science. 2019. V. 84. № 10. P. 2868–2875. DOI: 10.1111/1750-3841.14802.

13. Sabanci S., Icier F. Evaluation of an ohmic assisted vacuum evaporation process for orange juice pulp // Food and Bioproducts Processing. 2022. V. 131. P. 156–163. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.09.008.

14. Sereechantarerk C., Hongsprabhas P., Chanput W., Kamonpatana P. Effects of ohmic heating on structural and physicochemical changes of whey proteins // Agriculture and Natural Resources. 2021. V. 55. № 3. P. 464–472.

15. Miranda C.G., Rodrigues R.M., Pereira R.N., Speranza P., Kurozawa L.E., Vicente A.A., Sato A.C.K. Influence of ohmic heating on lentil protein structure and protein-pectin interactions // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2023. V. 87. P. 103413. DOI: 10.1016/j.ifset.2023.103413.

16. Darvishi H., Mohammadi P., Fadavi A., Koushesh-Saba M., Behroozi-Khazaei N. Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic-vacuum heating // Food Chemistry. 2019. V. 289. P. 292–298. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.03.083.

Сведения об авторах

Попов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000, тел. +79039429357, e-mail: popov4116@yandex.ru;

Узунов Глеб Борисович, аспирант, директор эндаумент-фонда, ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Москва, +79254240394, uzunovgleb@edu.misis.ru;

Плотников Константин Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000, тел. +79049612649, e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com;

Плотников Игорь Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000, тел. +79050695566, e-mail: plotnikov-ib@mail.ru;

Бузаков Алексей Станиславович, аспирант, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000, тел. +79039160225, e-mail: ipbuzakovas@mail.ru.

Information about authors

Popov Anatoly Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor at the department of mechatronics and automation of technological systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, phone: +79039429357, e-mail: popov4116@yandex.ru;

Uzunov Gleb Borisovich, postgraduate student, director of the endowment fund, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National University of Science and Technology «MISIS», 4 Leninsky Prospekt, bldg. 1, Moscow, Russia,119049, phone: +79254240394, e-mail: uzunovgleb@edu.misis.ru;

Plotnikov Konstantin Borisovich, doctor of technical sciences, professor at the department of mechatronics and automation of technological systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, phone: +79049612649, e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com;

Plotnikov Igor Borisovich, candidate of technical sciences (PhD), associate professor at the department of mechatronics and automation of technological systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, phone: +79050695566, e-mail: plotnikov-ib@mail.ru;

Buzakov Alexey Stanislavovich, postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kemerovo State University», 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000, phone: +79039160225, e-mail: ipbuzakovas@mail.ru.

УДК 62-2.001.5.004.62/.63

Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев, Н.А. Березина, Н.С. Чернышов

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПРИ КАРБОВИБРОДУГОВОМ УПРОЧНЕНИИ

Аннотация. Обеспечение стабильного горения электрической дуги является основополагающим фактором при получении качественных композитных покрытий способом карбовибродугового упрочнения, который определяет однородность структуры и физико-механические свойства наплавленного слоя. Цель работы – теоретико-экспериментальное определение технологических параметров, гарантирующих устойчивое горение дугового разряда при плавлении многокомпонентных паст. В исследованиях применяли многокомпонентные пасты на базе железного матричного порошка ПГ-ФБХ6-2 с добавлением карбида бора B_4C и криолита Na_3AlF_6. Эксперименты проводили на установке ВДГУ-2 с использованием вибрирующего угольного электрода. Установлено, что ключевым условием инициирования и поддержания устойчивого горения дуги выступает создание критической напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре. По результатам исследований выявлена нелинейная обратно пропорциональная зависимость величины напряженности поля от толщины отвержденного слоя многокомпонентной пасты и технологических параметров процесса (амплитуды и частоты вибрации угольного электрода). При этом химический состав многокомпонентных паст в исследованных пределах не оказывает достоверного влияния на электрические характеристики процесса устойчивого горения дуги. По результатам исследований математически и экспериментально обоснованы рациональные технологические параметры процесса карбовибродугового упрочнения: максимальная толщина высушенного слоя пасты – в пределах 2,1…2,4 мм, амплитуда вибрации электрода – 0,5 мм, частоте – 25 Гц. Данные технологические параметры обеспечивают надежный пробой отвержденного слоя многокомпонентной пасты и стабильное формирование композитного покрытия. Нанесение данных покрытий способствует значительному увеличению долговечности упрочненных рабочих поверхностей деталей машин различного назначения, например, лезвийных поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники, что формирует условия для импортозамещения, ресурсосбережения и технологического суверенитета нашей страны.

Ключевые слова: карбовибродуговое упрочнение, композитное покрытие, многокомпонентная паста, электрическая дуга, напряженность поля, угольный электрод.

JUSTIFICATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF STABLE COMBUSTION OF AN ELECTRIC ARC DURING CARBO-VIBRO-ARC HARDENING

Abstract. Ensuring stable electric arc combustion is a fundamental factor in producing high-quality composite coatings using carbo-vibro-arc hardening, as it determines the structural homogeneity and physical and mechanical properties of the deposited layer. The aim of this study is to theoretically and experimentally determine the process parameters that guarantee stable arc discharge combustion during melting of multicomponent pastes. The studies utilized multicomponent pastes based on PG-FBKh6-2 iron matrix powder with the addition of boron carbide (B_4C) and cryolite (Na_3AlF_6). The experiments were conducted on a VDGU-2 setup using a vibrating carbon electrode. It was established that the key to initiating and maintaining stable arc combustion is the creation of a critical electric field strength in the interelectrode gap. The conducted research revealed a nonlinear, inversely proportional relationship between the field strength and the thickness of the cured multi-component paste layer, as well as the process parameters (carbon electrode vibration amplitude and frequency). Furthermore, the chemical composition of the multi-component pastes within the studied ranges does not significantly affect the electrical characteristics of stable arc combustion. Based on the conducted research, rational process parameters for carbo-vibro-arc hardening were mathematically and experimentally substantiated: the maximum thickness of the dried paste layer should be within the range of 2,1...2,4 mm with an electrode vibration amplitude of 0,5 mm and a frequency of 25 Hz. These process parameters ensure reliable breakdown of the cured multi-component paste layer and stable formation of the composite coating. Application of these coatings will significantly increase the durability of hardened working surfaces of machine parts for various purposes, such as the blade surfaces of agricultural machinery, which will contribute to import substitution, resource conservation, and the technological sovereignty of our country.

Keywords: carbo-vibro-arc hardening, composite coating, multi-component paste, electric arc, field strength, carbon electrode.

Введение. Современные тенденции в ремонтном производстве связаны с созданием на изнашиваемых поверхностях деталей машин упрочняющих композитных покрытий на основе новых материалов, способных значительно повышать их физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики [1-6]. Создание композиционных материалов и функциональных покрытий на их основе является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Проведение научных исследований в данной области знаний соответствует: стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 28.02.2024 г. № 145, в части осуществления перехода к современным производственным технологиям и новым материалам; перечню важнейших наукоемких технологий, утвержденному Указом Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий», в части разработки инновационных технологий создания новых материалов с требуемыми свойствами и эксплуатационными характеристиками; стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 07.07.2017 г. № 1455-р.

Среди современных способов создания композитных покрытий перспективным является способ карбовибродугового упрочнения (КВДУ) [7-15]. Процесс реализации способа состоит из двух основных этапов. Первый этап основан на форми-

© Титов Н. В., Коломейченко А. В., Логачев В. Н., Березина Н. А., Чернышов Н. С., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

ровании на упрочняемой поверхности детали равномерного слоя многокомпонентной пасты (МКП) определенной толщины [7, 12, 15]. На втором этапе после полимеризации МКП осуществляется ее расплавление с применением вибрирующего угольного электрода [7, 15]. Наиболее широко используемые при КВДУ составы МКП и оборудование для реализации способа рассмотрены во многих научных работах [7, 9, 11, 15]. Способ чаще всего используют для повышения долговечности лезвийных поверхностей рабочих органов сельскохозяйственной техники, что делает его особенно актуальным и востребованным, т.к. данная проблема в настоящее время стоит очень остро.

При реализации способа происходит плавление как самой МКП, так и поверхностного слоя упрочняемой детали. Важным технологическим условием здесь является полное расплавление слоя МКП и ее надежное сплавление с материалом упрочняемой детали без ее сквозного проплавления. Это требование особенно важно при незначительной толщине упрочняемой поверхности, соизмеримой с толщиной слоя нанесенной и высушенной МКП. Большинство теоретических исследований данного способа посвящено рассмотрению вопросов, связанных с устойчивым зажиганием электрической дуги при КВДУ, получен ряд математических зависимостей, характеризующих данный процесс [11-13]. Вместе с тем исследования, направленные на комплексное установление факторов, обеспечивающих устойчивое горение дуги при КВДУ, в значительной степени определяющее создание на упрочняемых поверхностях деталей машин однородных качественных покрытий, пока еще нельзя считать в полной мере завершенными, что и определило цель настоящей работы. Она заключается в теоретико-экспериментальном определении технологических параметров, гарантирующих устойчивое горение дугового разряда при плавлении МКП, обеспечивающих создание композитных покрытий высокого качества. Проведение исследований в данной области имеет также важное народно-хозяйственное значение для выполнения Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. №20.

Методы исследования. При формировании способом КВДУ композитных покрытий использовали МКП, содержащие матричный порошок ПГ-ФБХ6-2 ГОСТ 21448-75 на железной основе, карбид бора B_4C ГОСТ 5744-85 и криолит Na_3AlF_6 ГОСТ 10561-80. В качестве связующего вещества использовали раствор клея ПВА-М [7, 12, 15]. Составы и концентрации компонентов МКП, использовавшихся при проведении исследований, представлены в таблице 1. Для каждого из трех исследуемых составов МКП план эксперимента предусматривал трехкратную повторность проводимых испытаний.

Приготовление МКП осуществляли механическим смешением компонентов в высокоэнергетической планетарной мельнице «Активатор 2*SL*», после чего наносили на поверхность экспериментальных образцов и высушивали при температуре 80…90 °С до отверждения [7, 12, 15]. Формирование композитных покрытий способом КВДУ на поверхности упрочняемых образцов из стали 65Г ГОСТ 14959-2016 осуществляли с использованием установки ВДГУ-2 [12, 15].

Таблица 1 – Составы и концентрации компонентов МКП, использовавшихся при проведении экспериментальных исследований

№ состава МКП	Концентрация компонентов МКП
1	Матричный порошок ПГ-ФБХ6-2 – 60 масс.%; карбид бора B_4C – 30 масс.%; криолит Na_3AlF_6 – 10 масс.%
2	Матричный порошок ПГ-ФБХ6-2 – 70 масс.%; карбид бора B_4C – 20 масс.%; криолит Na_3AlF_6 – 10 масс.%
3	Матричный порошок ПГ-ФБХ6-2 – 80 масс.%; карбид бора B_4C – 10 масс.%; криолит Na_3AlF_6 – 10 масс.%

Сила тока при формировании композитных покрытий составляла 70…75 А, амплитуда *A* вибрации угольного электрода составляла 0,5 и 1,1 мм, частота *f* вибрации угольного электрода составляла 25 и 50 Гц. При проведении исследований использовали угольные электроды *OK Carbon* диаметром 8 мм [7, 15].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ литературных источников и предварительные проведенные эксперименты [11-13, 16, 17] подтверждают, что залогом успешной реализации КВДУ является бесперебойное горение дугового разряда в зазоре «вибрирующий электрод – слой отвердевшей МКП». Физической основой данного процесса выступает создание критической напряженности электрического поля *E* [12]:

$$E = \frac{U - U_к - U_a}{h \cdot (1 + \beta \cdot \sqrt[3]{a \cdot R^2 \cdot S^2})}, \quad (1)$$

где *U* – выходное напряжение инвертора, В; $U_к$, U_a – катодное и анодное падения напряжения, В; *h* – толщина отвержденного слоя МКП, мм; β – поправочный коэффициент влияния вибрационной составляющей на *E*, $с^{2/3}мм^{-5/3}Ом^{2/3}$; *a* – ускорение вибрирующего электрода, $мм/с^2$:

$$a = 4A\pi^2 f^2,$$

где *A* – амплитуда вибрации угольного электрода, мм; *f* – частота вибрации угольного электрода, Гц; *R* – электрическое сопротивление контактной зоны, Ом:

$$R = \mu h^5,$$

где μ – коэффициент, учитывающий влияние толщины пасты на сопротивление, $\mu = 28500$ $Ом/мм^5$; *S* – эффективная площадь микронеровностей в зоне контакта, $мм^2$:

$$S = 0{,}25\pi d^2,$$

где *d* – диаметр угольного электрода, мм.

С учетом подстановки выражений для *a*, *R* и *S*, критериальное условие (1) стабильного горения дуги преобразуется в следующий вид:

$$E = \frac{U - U_к - U_a}{h(1 + 2{,}87 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{A \cdot f^2 \cdot \mu^2 \cdot h^{10} \cdot d^4})} \geq E_Г \quad , \tag{2}$$

где $E_Г$ – пороговое значение напряженности поля, необходимое для поддержания дугового разряда, В/мм.

При определении коэффициента β в зависимости (2) использовались образцы с нанесенной МКП, толщина слоя которой начиналась с 1,5 мм и далее увеличивалась с шагом 0,1 мм. На первом этапе вибрация угольного электрода не включалась. При подаче напряжения после начала горения дуги фиксировали значения U и предельное значение h_M, по достижении которого происходил срыв дуги. Напряженность $E_Г$ в данном случае рассчитывали по формуле:

$$E_Г = \frac{U - U_к - U_a}{h_M} \quad . \tag{3}$$

На втором этапе задавались минимальные технологические параметры процесса (A=0,5 мм, f=25 Гц). После подачи напряжения и его стабилизации на уровне U_0=35…40 В включался вибропривод. Фиксировалось напряжение пробоя для образцов с постепенно уменьшающейся толщиной h (шаг 0,1 мм) до момента надежного зажигания дуги. Аналогичный эксперимент был реализован для f=50 Гц при той же амплитуде, а также для A=1,1 мм при обеих исследуемых частотах. На основе зависимости (3) были вычислены усредненные значения $E_Г$, их дисперсии и итоговый коэффициент β, определяемый как:

$$\beta = 0{,}36 \frac{\frac{h_M}{h_{\max}} - 1}{\sqrt[3]{A \cdot f^2 \cdot \mu^2 \cdot h_{\max}^{10} \cdot d^4})} \quad . \tag{4}$$

Расчетным путем установлено, что среднестатистическое значение коэффициента β равно $1{,}05 \cdot 10^{-6}$. Результаты экспериментальных исследований по определению напряженности $E_Г$ сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты исследований величины $E_Г$, обеспечивающей устойчивое горение электрической дуги при КВДУ

№ состава МКП	Толщина слоя МКП, мм	$U_г - U_к - U_a$, В				Напряженность электрического поля $E_Г$, В/мм
		$U_{г(1)}$	$U_{г(2)}$	$U_{г(3)}$	$U_{г(ср)}$	
1	0,5	20	20	19	19,7	3,4
	1,5	24	23	22	23	3,3
	2,5	25	25	26	25,3	2,9
2	0,5	19	19	20	19,3	2,6
	1,5	22	23	23	22,7	3,1
	2,5	26	25	26	25,7	3,1
3	0,5	20	19	20	19,7	3,4
	1,5	23	23	22	22,7	3,1
	2,5	25	26	25	25,3	2,9
Среднее значение, В/мм						3,1
Минимальная напряженность устойчивого горения дуги $E_{Г(min)}$, В/мм						2,3
Напряженность гарантированного устойчивого горения дуги $E_{Г(max)}$, В/мм						3,9

Сопоставление данных таблицы 2 позволяет сделать вывод о том, что варьирование массовых долей компонентов в составе МКП не вносит значительных корректив в величину напряженности поля $E_Г$. Следовательно, выражение (2) с учетом данных, представленных в таблице 2, и эмпирического коэффициента β принимает вид:

$$E = K \cdot E_0 \geq E_{Г(\max)} \quad , \tag{5}$$

где K – коэффициент пропорциональности, равный:

$$K = (1 + 2{,}87 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{A \cdot f^2 \cdot \mu^2 \cdot h^{10} \cdot d^4})^{-1} \quad ; \tag{6}$$

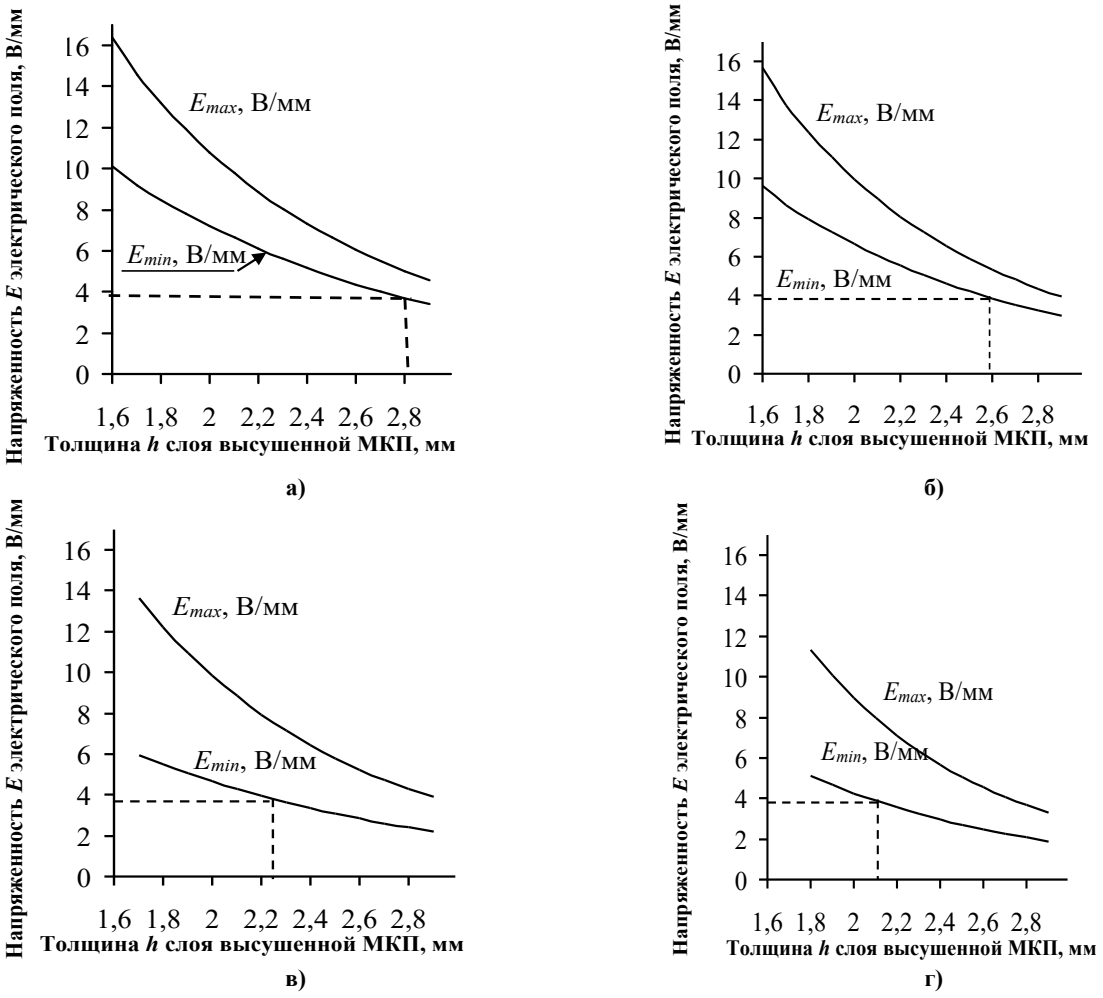
E_0 – базовая напряженность поля в статическом режиме (без вибрации):

$$E_0 = \frac{U - U_к - U_a}{h}. \quad (7)$$

В графическом виде данные зависимости представлены на рисунке 1.

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что увеличение A и f электрода способствует снижению допустимой для стабильного горения дуги толщины h, которая в рассматриваемых интервалах варьирования технологических параметров варьируется от 2,1 до 2,8 мм.

Некоторое увеличение толщины слоя высушенной МКП, при котором обеспечивается устойчивое зажигание и горение дуги при КВДУ, может быть достигнуто путем увеличения напряжения сварочного инвертора до 55…60 В, что вполне позволяет сделать принятая в качестве базовой установка ВДГУ-2.



***а) A*=0,5 мм, *f*=25 Гц; *б) A*=0,5 мм, *f*=50 Гц;**
***в) A*=1,1 мм, *f*=25 Гц; *г) A*=1,1 мм, *f*=50 Гц**

Рис. 1 – Поля допустимых значений E_{max} и E_{min} в зависимости от толщины h слоя МКП

Максимальная толщина наносимой и высушиваемой МКП лимитируется, в первую очередь, условиями надежного инициирования электрической дуги. При этом сам процесс дугового разряда сохраняет стабильность и при более значительных толщинах покрытия. Физика этого явления обусловлена расширением столба дуги до диаметра угольного электрода, что влечет за собой падение омического сопротивления и, как следствие, снижение напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре. Опираясь на результаты исследований [11, 12], оптимальным диапазоном толщины высохшего слоя МКП, гарантирующим как свободный поджиг, так и стационарное горение, следует считать h=2,1…2,4 мм.

Анализ приведенных выше результатов исследований процесса устойчивого горения дуги при КВДУ показывает, что к наиболее рациональной технологической схеме создания на упрочняемых рабочих поверхностях деталей машин композитных покрытий способом КВДУ можно отнести:

– нанесение на упрочняемую поверхность МКП требуемого состава слоем толщиной 2,1…2,4 мм и последующая его сушка до полного высыхания;

– предустановка кинематики вибропривода (A=0,5 мм, f=25 Гц) и позиционирование электрода до касания с высушенной МКП;

– подача напряжения и выдержка невибрирующего электрода до падения напряжения инвертора до значения:

$$U^* = U_a + U_к + E_3 \cdot h, \quad (8)$$

– включение вибрации и начало продольной подачи электрода вдоль наплавляемой поверхности.

При реализации технологии КВДУ в промышленных условиях вследствие достаточно высокого сопротивления слоя высушенной МКП и отклонений в пределах допуска его толщин после высыхания необходимо выдерживать в достаточно узком диапазоне как вышеуказанную схему процесса для обеспечения стабильного горения дуги, так и расстояние до поверхности, на которую нанесен слой МКП. В связи с этим, целесообразно осуществление модернизации принятой в качестве базовой серийно выпускаемой установки ВДГУ-2 с введением в ее конструкцию автоматизированных средств оперативного контроля напряжений на клеммах питания и разработка оснастки для точного позиционирования электрода и включения его вибрации с требуемыми по технологическому процессу значениями *A* и *f*. Также целесообразно внедрение подсистемы адаптивного контроля скорости движения электрода при реализации технологии КВДУ.

Создание качественных высокоизносостойких композитных покрытий способом КВДУ способствует значительному увеличению долговечности упрочненных рабочих поверхностей деталей машин различного назначения, например, лезвийных поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники, что формирует условия для импортозамещения, ресурсосбережения и технологического суверенитета нашей страны.

Выводы. Таким образом, окончательно следует сформулировать следующие выводы.

1.Получена зависимость формирования напряженности *E* в межэлектродном пространстве при КВДУ, которая учитывает толщину *h* слоя высушенной МКП, его сопротивление *R,* амплитуду *A*, частоту *f* вибрации и диаметр *d* угольного электрода.

2.Основным фактором, снижающим напряженность поля *E*, является увеличение толщины *h* отвержденного слоя МКП. Увеличение параметров вибровоздействия амплитуды *A* и частоты *f* вибрации также снижает значение величины *E*, данная зависимость носит выраженный нелинейный характер.

3.Теоретически и экспериментально обоснованы рациональные технологические режимы КВДУ, гарантирующие стабильность дугового разряда и горения дуги, высокую гомогенность сформированных композитных покрытий: амплитуда *A*=0,5 мм, частота *f*=25 Гц, рекомендуемая толщина *h*=2,1…2,4 мм.

4.Создание качественных композитных покрытий высокой гомогенности способом КВДУ позволит значительно увеличить долговечность упрочненных рабочих поверхностей деталей машин различного назначения, например, лезвийных поверхностей рабочих органов сельскохозяйственной техники, что формирует условия развития импортозамещения, ресурсосбережения и технологического суверенитета нашей страны.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FEEF-2026-0002.

Библиография

1. Шарая О.А., Пастухов А.Г., Кравченко И.Н. Инженерия поверхности упрочненных деталей: монография. М. : ИНФРА-М, 2020. 124 с.

2. Лялякин В.П. Развитие индустрии по восстановлению деталей для сельскохозяйственных машин в России // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. № 2. С. 4–10. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10.

3. Ерохин М.Н., Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. и др. Критериальное обоснование выбора технических средств для способа приварки ремонтной детали к диску сошника // Агроинженерия. 2026. Т. 28. № 2. С. 56–66. DOI 10.26897/2687-1149-2026-2-56-66.

4. Кадырметов А.М., Попов Д.А., Снятков Е.В. Перспективы применения высокоэнтропийных сплавов для восстановления деталей машин атмосферным плазменным напылением // Мир транспорта и технологических машин. 2021. № 1(72). С. 20–27. DOI 10.33979/2073-7432-2021-72-1-20-27.

5. Беликов А.И., Данилов М.А., Петров В.В. и др. Исследование влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 12(156). С. 562–567.

6. Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., Кадырметов А.М. и др. Технологическое оснащение для оптимизации плазменного напыления по параметру скорости напыляемых частиц // Воронежский научно-технический Вестник. 2022. Т. 1. № 1(39). С. 15–23. DOI 10.34220/2311-8873-2022-15-23.

7. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Логачев В.Н. и др. Исследование микротвердости и микроструктуры металлокерамических покрытий, формируемых при карбовибродуговом упрочнении // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 1(45). С. 47–52.

8. Bazhin P.M., Zhidovich A.O., Stolin A.M., Titov N.V., Kolomeichenko A.V., Avdeeva V.V. Features of the carbo-vibroarc surfacing in the development of multicomponent cermet wear-resistant coatings // Surface and Coatings Technology. 2022. Т. 429. С. 127952. https:// dol.org/ 10.1016/ j. surfcoat.2021.127952.

9. Адигамов Н.Р., Гималтдинов И.Х., Галиев И.Г. и др. Обработка результатов экспериментальных исследований использования технологий комплексного микроплазменного упрочнения рабочих органов и деталей сельскохозяйственных машин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3(71). С. 68–75.

10. Шарифуллин С.Н. Наноструктурирование износостойких покрытий рабочих органов сельскохозяйственных машин методом виброплазменной обработки // Технический сервис машин. 2022. № 2(147). С. 104–112.

11. Виноградов В.В. Исследование зажигания дуги при упрочнении рабочих органов машин карбовибродуговым методом // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 4(19). С. 322–327.

12. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Агеев Е.В. и др. Формирование композитных покрытий карбовибродуговым упрочнением // Вестник машиностроения. 2022. № 1. С. 62–67. DOI 10.36652/0042-4633-2022-1-62-67.

13. Sharifullin S.N., Abzhaev M.M., Bainiyazova A.T. Simulation of the process of electric spark hardening of the surfaces of machine parts and mechanisms // High Energy Chemistry. 2023. Vol. 57. № S1. P. S193–S199. DOI 10.1134/s001814392307041x.

14. Задорожний Р.Н., Тужилин С.П. Металлографические исследования стальных образцов, упрочненных карбовибродуговой наплавкой // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124. № 2. С. 57–61.

15. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Логачев В.Н. и др. Повышение ресурса рабочих органов плугов, имеющих лучевидный износ, карбовибродуговым упрочнением // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2023. № 2(38). С. 53–58.

16. Sharifullin S.N., Adigamov N.R., Kudryashova E.Yu. et al. Metallographic studies of samples made of 65g steel subjected to complex treatment by electrospark and vibration arc discharges using cermet powders // Journal of Agriculture and Environment. 2019. № 4(12). P. 105–115. DOI 10.23649/jae.2019.4.12.20.

17. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Бажин П.М., Столин А.М. Особенности микроструктуры композиционных металлокерамических покрытий, формируемых карбовибродуговым упрочнением с использованием многокомпонентных паст, содержащих карбид вольфрама // Композиты и наноструктуры. 2023. Т. 15. № 3. С. 162–169. DOI 10.36236/1999-7590-2023-15-3-162-169.

References

1. Sharaya O.A., Pastukhov A.G., Kravchenko I.N. Inzheneriya poverkhnosti uprochnennykh detaley: monografiya [Surface engineering of hardened parts: monograph.]. M. : INFRA-M, 2020. 124 p.

2. Lyalyakin V.P. Razvitiye industrii po vosstanovleniyu detaley dlya sel'skokhozyaystvennykh mashin v Rossii [Development of the industry for the restoration of parts for agricultural machinery in Russia] // Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2024. T. 18. № 2. S. 4–10.

3. Yerokhin M.N., Pastukhov A.G., Timashov Ye.P. i dr. Kriterial'noye obosnovaniye vybora tekhnicheskikh sredstv dlya sposoba privarki remontnoy detali k disku soshnika [Criteria justification for the selection of technical means for the method of welding a repair part to a coulter disk] // Agroinzheneriya. 2026. T. 28. № 2. S. 56–66.

4. Kadyrmetov A.M., Popov D.A., Snyatkov Ye.V. Perspektivy primeneniya vysokoentropiynykh splavov dlya vosstanovleniya detaley mashin atmosfernym plazmennym napyleniyem [Prospects for the use of high-entropy alloys for the restoration of machine parts by atmospheric plasma spraying] // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2021. № 1(72). S. 20–27.

5. Belikov A.I., Danilov M.A., Petrov V.V. i dr. Issledovaniye vliyaniya diskretnoy struktury na tribologicheskiye svoystva antifriktsionnykh uprochnyayushchikh kompozitnykh pokrytiy [Study of the influence of discrete structure on the tribological properties of antifriction strengthening composite coatings] // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. 2017. № 12(156). S. 562–567.

6. Plakhotin A.A., Mandrykin I.A., Kadyrmetov A.M. i dr. Tekhnologicheskoye osnashcheniye dlya optimizatsii plazmennogo napyleniya po parametru skorosti napylyayemykh chastits [Technological equipment for optimizing plasma spraying based on the velocity parameter of sprayed particles] // Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy Vestnik. 2022. T. 1. № 1(39). S. 15–23.

7. Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Logachev V.N. i dr. Issledovaniye mikrotverdosti i mikrostruktury metallokeramicheskikh pokrytiy, formiruyemykh pri karbovibrodugovom uprochnenii [Study of microhardness and microstructure of metal-ceramic coatings formed by carbo-vibratory arc hardening] // Innovatsii v APK: problemy i perspektivy. 2025. № 1(45). S. 47–52.

8. Bazhin P.M., Zhidovich A.O., Stolin A.M., Titov N.V., Kolomeichenko A.V., Avdeeva V.V. Features of the carbo-vibroarc surfacing in the development of multicomponent cermet wear-resistant coatings // Surface and Coatings Technology. 2022. T. 429. C. 127952. https:// dol.org/ 10.1016/ j. surfcoat.2021.127952.

9. Adigamov N.R., Gimaltdinov I.Kh., Galiyev I.G. i dr. Obrabotka rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy ispol'zovaniya tekhnologiy kompleksnogo mikroplazmennogo uprochneniya rabochikh organov i detaley sel'skokhozyaystvennykh mashin [Processing of the results of experimental studies of the use of technologies for complex microplasma hardening of working bodies and parts of agricultural machinery] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023. T. 18. № 3(71). S. 68–75.

10. Sharifullin S.N. Nanostrukturirovaniye iznosostoykikh pokrytiy rabochikh organov sel'skokhozyaystvennykh mashin metodom vibroplazmennoy obrabotki [Nanostructuring of wear-resistant coatings of working parts of agricultural machines by the method of vibration plasma treatment] // Tekhnicheskiy servis mashin. 2022. № 2(147). S. 104–112.

11. Vinogradov V.V. Issledovaniye zazhiganiya dugi pri uprochnenii rabochikh organov mashin karbovibrodugovym metodom [Study of arc ignition during hardening of working parts of machines by carbo-vibratory arc method] // Innovatsii v sel'skom khozyaystve. 2016. № 4(19). S. 322–327.

12. Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Ageyev Ye.V. i dr. Formirovaniye kompozitnykh pokrytiy karbovibrodugovym uprochneniyem [Formation of composite coatings by carbide-arc hardening] // Vestnik mashinostroyeniya. 2022. № 1. S. 62–67.

13. Sharifullin S.N., Abzhaev M.M., Bainiyazova A.T. Simulation of the process of electric spark hardening of the surfaces of machine parts and mechanisms // High Energy Chemistry. 2023. Vol. 57. № S1. P. S193–S199. DOI 10.1134/s001814392307041x.

14. Zadorozhniy R.N., Tuzhilin S.P. Metallograficheskiye issledovaniya stal'nykh obraztsov, uprochnennykh karbovibrodugovoy naplavkoy [Metallographic studies of steel samples strengthened by carbo-vibration-arc surfacing] // Trudy GOSNITI. 2016. T. 124. № 2. S. 57–61.

15. Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Logachev V.N. i dr. Povysheniye resursa rabochikh organov plugov, imeyushchikh luchevidnyy iznos, karbovibrodugovym uprochneniyem [Increasing the service life of working parts of plows with radial wear using carbide-vibration arc hardening] // Innovatsii v APK: problemy i perspektivy. 2023. № 2(38). S. 53–58.

16. Sharifullin S.N., Adigamov N.R., Kudryashova E.Yu. et al. Metallographic studies of samples made of 65g steel subjected to complex treatment by electrospark and vibration arc discharges using cermet powders // Journal of Agriculture and Environment. 2019. № 4(12). P. 105–115. DOI 10.23649/jae.2019.4.12.20.

17. Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Bazhin P.M., Stolin A.M. Osobennosti mikrostruktury kompozitsionnykh metallokeramicheskikh pokrytiy, formiruyemykh karbovibrodugovym uprochneniyem s ispol'zovaniyem mnogokomponentnykh past, soderzhashchikh karbid vol'frama [Features of the microstructure of composite metal-ceramic coatings formed by carbo-vibration arc hardening using multicomponent pastes containing tungsten carbide] // Kompozity i nanostruktury. 2023. T. 15. № 3. S. 162–169.

Сведения об авторах

Титов Николай Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой 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 4862 43-19-79, e-mail: ogau@mail.ru;

Коломейченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, главный специалист управления перспективных технологий Центра сельскохозяйственного машиностроения, Государственный научный центр Российской Фе-

дерации ФГУП «НАМИ», ул. Автомоторная, д. 2, г. Москва, Россия, 125438, тел. +7 495 456-42-50, доб. 64-23, e-mail: a.kolomiychenko@nami.ru;

Логачев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент 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 4862 43-19-79, e-mail: logvovan@mail.ru;

Березина Наталья Александровна, доктор технических наук, профессор, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, 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: prorector4orelsau@mail.ru;

Чернышов Николай Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент 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 4862 43-19-79, e-mail: black-79@mail.ru.

Information about authors

Titov Nikolay Vladimirovich, doctor of technical science, associate professor, head of the reliability and machine repair department, 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 43-19-79, e-mail: ogau@mail.ru;

Kolomeichenko Aleksandr Viktorovich, doctor of technical sciences, Center of agricultural engineering, Central research and development automobile and engine institute NAMI, Avtomotornaya St., 2, Moscow, Russia, 125438, +7 495 456-42-50, ext. 65-28, e-mail: a.kolomiychenko@nami.ru;

Logachev Vladimir Nikolayevich, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the reliability and machine repair department, 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 43-19-79, 302019, e-mail: logvovan@mail.ru;

Berezina Natalia Aleksandrovna, doctor of technical sciences, professor, vice-rector for digitalization, scientific and innovative activities, 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: prorector4orelsau@mail.ru;

Chernyshov Nikolay Sergeevich, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the reliability and machine repair department, 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 43-19-79, e-mail: black-79@mail.ru.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОНОМИИ

УДК 631.452

А.В. Бурлуцкий, В.Б. Азаров, Н.И. Клостер

ГУМУСОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЁМА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ В БИОЛОГИЧЕСКОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ ЦЧР

Аннотация. В юго-западной части Центрально-Черноземной зоны России заложены полевые опыты с целью изучить влияние органических, минеральных удобрений, а также посевов сидеральных культур на изменение содержания в почве специфического органического вещества – гумуса. Опыты были заложены в двух административных районах Белгородской области – Белгородском и Прохоровском в зоне распространения типичных черноземов. Варианты опытов включали в себя различную насыщенность органическими и минеральными удобрениями, а также их совместное применение. Во втором полевом опыте изучалось действие зелёного удобрения или сидеральной культуры. По истечении ротации трехпольного зернового севооборота с чередованием культур соя – озимая пшеница – кукуруза на зерно установлено, что средний показатель содержания гумуса в пахотном горизонте составил 5,13 %, в подпахотном – 4,35 %, что соответствует градации средней обеспеченности почвы органическим веществом. С глубиной запасы гумуса в почве снижаются по причине сокращения возможного поступления свежего органического вещества за счет накопления в почве корневых растительных остатков. Исследованиями установлено, что без применения удобрений содержание гумуса в почве снизилось на 0,06–0,15 %, при минеральной системе удобрения на 0,12–0,33 %. Органические удобрения в виде сидератов оказали положительное влияние на повышение содержания гумуса в почве, увеличивая его на 0,08–0,11 % и нивелировали отрицательное действие минеральных удобрений, особенно в слое 0–20 см. В целом благодаря высокой культуре земледелия, использованию биологических методов в агротехнологиях возделывания зерновых культур гумусовое состояние чернозёма при его сельскохозяйственном использовании находится на высоком уровне.

Ключевые слова: гумус, агротехнологии, биологизация, сидераты, органические удобрения.

HUMUS STATE OF CHERNOZEM WHEN USING ORGANIC FERTILIZERS IN THE BIOLOGICAL AGRICULTURE OF THE CDR

Abstract. Field experiments have been conducted in the southwestern part of the Central Chernozem Zone of Russia in order to study the effect of organic, mineral fertilizers, as well as sowings of sideral crops on changes in the content of a specific organic substance in the soil – humus. The experiments were laid in two administrative districts of the Belgorod region - Belgorod and Prokhorovsky in the zone of distribution of typical chernozems. The variants of the experiments included different saturation with organic and mineral fertilizers, as well as their combined use. In the second field experiment, the effect of green fertilizer or sideral culture was studied. After the rotation of the three–field grain crop rotation with alternating crops of soy – winter wheat – corn for grain, it was found that the average humus content in the arable horizon was 5.13%, in the sub-arable horizon – 4.35 %, which corresponds to the gradation of the average availability of organic matter in the soil. With depth, humus reserves in the soil decrease due to a reduction in the possible supply of fresh organic matter due to the accumulation of root plant residues in the soil. Studies have found that without the use of fertilizers, the humus content in the soil decreased by 0.06–0.15 %, with a mineral fertilizer system by 0.12–0.33 %. Organic fertilizers in the form of siderates had a positive effect on increasing the humus content in the soil, increasing it by 0.08–0.11 % and leveled the negative effect of mineral fertilizers, especially in the layer 0–20 cm . In general, due to the high culture of agriculture, the use of biological methods in agricultural technologies of grain cultivation, the humus state of chernozem during its agricultural use is at a high level.

Keywords: humus, agrotechnologies, biologization, siderates, organic fertilizers.

Вопросам сохранения и воспроизводства плодородия почвы при её интенсивной эксплуатации в процессе сельскохозяйственного использования всегда уделялось особое внимание как со стороны товаропроизводителей, так и учёными-аграриями [2, 3]. В Центрально-Черноземной зоне России, где пахотными угодьями занято около 90 % площадей, эта проблема является одной из самых актуальных. Интегральным показателем плодородия почвы является содержание в ней органического вещества – гумуса. Хорошо гумусированные почвы обладают высоким плодородным потенциалом, имеют лучшие агрофизические свойства и повышенный уровень биологической активности [4, 5]. За более чем столетний период наблюдений за этим показателем в границах Белгородской области содержание гумуса уменьшилось в 2,5 раза – с 7,8 % до 3,5 % на старопахотных землях [1, 6, 7]. Таким образом, данный показатель почвенного плодородия нуждается в приумножении в процессе реализации интенсивных агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Цель наших исследований – выявить зависимость содержания гумуса в почве от различных элементов биологических технологий.

Полевые эксперименты, призванные достичь цели исследований, были заложены на полях Белгородской зерновой компании, являющейся структурным подразделением агропромышленного комплекса «Белая птица». В целях наиболее полного изучения биологических элементов агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур было осуществлено два полевых опыта в Белгородском и Прохоровском районах Белгородской области.

Опыты проводились в течение полной ротации экспериментальных трехпольных севооборотов, отвечающим общей специализации хозяйства, признанной обеспечивать полноценными качественными кормами основное производство холдинга – птицеводческое.

© Бурлуцкий А. В., Азаров В. Б., Клостер Н. И., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Опыт № 1. Белгородское отделение.

Тема исследований: изучение влияния органических удобрений в виде компоста на основе птичьего помета на продуктивность сои, озимой пшеницы, кукурузы на зерно и плодородие почвы.

Вид исследований: стационарный двухфакторный опыт, развернутый во времени и пространстве.

Исследования проводились в течение полной ротации экспериментального трехпольного севооборота: соя – озимая пшеница – кукуруза на зерно.

Изучаемые факторы:

фактор А – применение органических удобрений. Вид удобрений – компост на основе птичьего помета;

А1 – без применения органических удобрений;

А2 – с применением органических удобрений в виде компоста на основе птичьего помета в дозе 14 т/га;

фактор В – применение минеральных удобрений в дозе, рассчитанной на планируемый урожай;

В1 – без применения минеральных удобрений;

В2 – с применением минеральных удобрений ½ дозы, рассчитанной на планируемый урожай;

В3 – с применением минеральных удобрений в полной дозе, рассчитанной на планируемый урожай.

Планируемый урожай: соя 2,5 т/га, пшеница 5 т/га, кукуруза 6 т/га зерна.

Варианты опыта:

1. Без применения органических и минеральных удобрений контроль.

Далее в таблицах, схемах и графиках в сокращении: Б/ОУ + Б/МУ.

2. Без применения органических удобрений + применение минеральных удобрений ½ дозы, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: Б/ОУ + 1/2МУ.

3. Без применения органических удобрений + применение минеральных удобрений в полной дозе, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: Б/ОУ + 1,0 МУ.

4. Органические удобрения (компост на основе птичьего помета) доза 14 т/га + без применения минеральных удобрений.

Далее в сокращении: ОУ + Б/МУ.

5. Органические удобрения (компост на основе птичьего помета) доза 14 т/га + применение минеральных удобрений в ½ дозы, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: ОУ + 1/2МУ.

6. Органические удобрения (компост на основе птичьего помета) доза 14 т/га + применение минеральных удобрений в полной дозе, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: ОУ +1,0МУ.

Полная доза минеральных удобрений с учетом коэффициентов возврата и использования составляет для сои 37 кг/га по азоту, для озимой пшеницы 115 кг/га и для кукурузы на зерно 135 кг/га по азоту.

Органические удобрения позволили использовать растениям 175 кг/га азота.

Ширина делянки равна ширине посевного и уборочного агрегата – 8 метров.

Длина делянки – 20 метров. Защитный коридор между блоками делянок – 10 метров (для удобства разворота техники). Повторность в опыте – трехкратная. Посевная площадь делянки 160 м^2, уборочная – 140 м^2.

Агротехника в опыте (обработка почвы, комплекс защиты растений, сроки проведения технологических операций) – общепринятая в хозяйстве.

Опыт № 2. Прохоровское отделение.

Тема исследований: изучение влияния промежуточного посева горчицы белой на продуктивность сои, озимой пшеницы, кукурузы на зерно и плодородие почвы.

Вид исследований: стационарный двухфакторный опыт, развернутый во времени и пространстве.

Изучаемые факторы:

фактор А – применение сидератов. Вид удобрений – промежуточный посев горчицы белой;

А1 – без посева сидеральной культуры;

А2 – с промежуточным посевом сидеральной культуры горчицы белой;

фактор В – применение минеральных удобрений в дозе, рассчитанной на планируемый урожай;

В1 – без применения минеральных удобрений;

В2 – с применением минеральных удобрений ½ дозы, рассчитанной на планируемый урожай;

В3 – с применением минеральных удобрений в полной дозе, рассчитанной на планируемый урожай.

Планируемый урожай: соя 2,5 т/га, пшеница 5 т/га, кукуруза 6 т/га зерна.

Варианты опыта:

1. Без посева сидератов и применения минеральных удобрений, контроль.

Далее в таблицах, схемах и графиках в сокращении: Б/С + Б/МУ.

2. Без посева сидератов + применение минеральных удобрений ½ дозы, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: Б/С + 1/2МУ.

3. Без посева сидератов + применение минеральных удобрений в полной дозе, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: Б/С + 1,0 МУ.

4. С промежуточным посевом сидеральной культуры горчицы белой + без применения минеральных удобрений.

Далее в сокращении: С + Б/МУ.

5. С промежуточным посевом сидеральной культуры горчицы белой + применение минеральных удобрений в ½ дозы, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: С + 1/2МУ.

6. С промежуточным посевом сидеральной культуры горчицы белой + применение минеральных удобрений в полной дозе, рассчитанной на планируемый урожай.

Далее в сокращении: С + 1,0МУ.

Среднее значение содержания азота в зеленой массе горчицы составляет 0,5 %, что при коэффициенте использования 0,8 и урожае 15–20 т/га позволяет использовать последующим культурам (кукуруза на зерно и соя) 60–80 кг/га азота.

Параметры опыта аналогичные предыдущему эксперименту.

Агротехника в опыте (обработка почвы, комплекс защиты растений, сроки проведения технологических операций) – общепринятая в хозяйстве (система обработки почвы – нулевая).

Консервативные показатели почвенного плодородия, не подвергающиеся существенным изменениям за короткий (3 года) период наблюдений, такие как содержание гумуса нами определялись в начале и в конце ротации севооборота с тем, чтобы установить характер динамики этих показателей в зависимости от изучаемых факторов.

Как показали данные по содержанию гумуса в пахотном (0–20 см) и подпахотном (20–40 см) слоях почвы, колебания величин находились в пределах 10-процентной вариабильности, что свидетельствует о достаточно высокой относительной однородности почвенного покрова опытного участка на Белгородском отделении. В среднем по 18 определениям в пределах пахотного и стольких же определений в подпахотных горизонтах почвы колебания не превышали 10 % как в сторону увеличения, так и понижения определяемого показателя.

Средний показатель содержания гумуса в пахотном горизонте составил 5,13 %, в подпахотном – 4,35 %, что соответствует градации средней обеспеченности почвы органическим веществом. С глубиной запасы гумуса в почве снижаются по причине сокращения возможного поступления свежего органического вещества за счет накопления в почве корневых растительных остатков.

В среднем по опыту по трем полям севооборота соя – озимая пшеница – кукуруза на зерно в слое 0–20 см содержание гумуса достоверно выше при внесении органических удобрений в дозе 14 т/га в виде компоста на основе птичьего помета как на первоначальную исходную дату отбора проб на 0,27 % при $НСР_{95}$=0,18, так и по истечении ротации севооборота на 0,49 % при $НСР_{95}$=0,10.

Внесение минеральных удобрений способствовало достоверному увеличению содержания гумуса по истечении ротации севооборота на 0,18 % при половинной дозе, на 0,33 % при полной дозе внесения минеральных удобрений на планируемый урожай при $НСР_{95}$=0,10, обеспечивая содержание гумуса на уровне 5,13 %, 5,28 % соответственно при значении на контрольном варианте 4,95 %.

Аналогичная ситуация наблюдается и в слое 20–40 см. Содержание гумуса в среднем по опыту при внесении органических удобрений на исходную дату составило 4,48 %, что достоверно выше, чем на контрольном варианте на 0,25 % при $НСР_{95}$=0,18. Через три года превышение составило 0,52 % при $НСР_{95}$=0,03.

Достоверное превышение по содержанию гумуса зафиксировано в варианте с половинной дозой внесения минеральных удобрений. По всем остальным изучаемым вариантам различия находятся в пределах ошибки опыта. Содержание гумуса составляло 4,31 % в контрольном варианте и 4,4 %, 4,3 % соответственно при половинной и полной дозе внесения минеральных удобрений.

Таким образом, по результатам анализа можно сделать вывод о том, что по истечении полной ротации трехпольного зернового севооборота содержание гумуса на контроле без применения удобрений и с чисто минеральной системой снизилось на величины от 0,11 до 0,14 абсолютных процента. Данное снижение зафиксировано как в верхнем слое почвы, так и в нижележащем на примерно одинаковые показатели от 0,12 до 0,16 абсолютных процента.

Наличие же в технологии возделывания органических удобрений способствовало некоторой стабилизации гумусового состояния. В данном случае отмечено незначительное увеличение на 0,06–0,15 %. Факт присутствия органики положительно сказывается на гумусовом балансе в почве независимо от минеральных удобрений. Объяснение данному факту заключается в связывании органического вещества птичьего помета и после трансформации микробным сообществом черноземов, вовлечении его в почвенные процессы с постепенной гумификацией.

В условиях Прохоровского района Белгородской области на опытах по изучению эффективности зеленого удобрения начальные показатели содержания в почве органического вещества были выше по сравнению с Белгородским отделением. Почвы Прохоровского района относятся к наиболее плодородным в регионе и представлены в основном черноземами типичными мощными с глубоким гумусовым горизонтом.

На всех вариантах опыта даже в слое 20–40 см содержание гумуса было на уровне 5,1–5,4 %, а в верхнем горизонте доходило до 7 %.

В этой ситуации за три года исследования даже на вариантах без внесения удобрений сокращение запасов гумуса не выглядело критичным и составило 0,06–0,15 %. Минеральные удобрения, формируя достаточный урожай, способствовали дальнейшему снижению гумусированности чернозема на величину 0,12–0,33 %.

Такой фактор опыта, как посев сидеральных промежуточных культур, не привел к резкому накоплению дополнительных запасов гумуса, однако несколько ослабил негативное действие минеральных удобрений. На этих вариантах за трехлетний период наблюдений динамика изменения содержания гумуса в почве колебалась от +0,11 при условии использования одних сидератов в нижнем корнеобитаемом слое почвы до такой же отрицательной величины при внесении полной дозы минеральных удобрений на фоне зеленого удобрения.

Так, в среднем по опыту органические удобрения в виде сидератов способствуют достоверному увеличению содержания гумуса в слое почвы 0–20 см как на первоначальную отчетную дату на 0,43 %, так и на дату полной ротации севооборота на 0,57 %. В слое 20–40 см изучаемый показатель был достоверно выше на конечную дату на 0,17 % при $НСР_{95}$=0,03.

При внесении минеральных удобрений только в начале ротации севооборота в слое 0–20 см в варианте с полной дозой на планируемый урожай отмечено существенное превышение содержания гумуса по сравнению с контрольным вариантом на 0,1 %. В дальнейшем этот факт был снивелирован и содержание гумуса было таким же, как и на контрольном варианте.

В слое 20–40 см после завершения ротации севооборота отмечено негативное влияние минеральных удобрений, снизивших существенно содержание гумуса на 0,09 % при половинной дозе внесения удобрений, и на 0,45 % при полной дозе.

Таким образом, вышеприведенные данные свидетельствуют о том, что без применения удобрений содержание гумуса в почве снизилось на 0,06–0,15 %, при минеральной системе удобрения на 0,12–0,33 %. Органические удобрения в виде сидератов оказали положительное влияние на повышение содержания гумуса в почве, увеличивая его на 0,08–0,11 % и нивелируют отрицательное действие минеральных удобрений, особенно в слое 0–20 см.

Библиография

1. Азаров В.Б. Агроэкологический мониторинг земель сельскохозяйственного назначения Юго-Западной части ЦЧЗ : автореф. дис. … доктора с.-х. наук / Азаров Владимир Борисович. Курск, 2004. 40 с.

2. Айдиев А.Ю. Основные направления биологизации земледелия / А. Ю. Айдиев, В. И. Лазарев // Инновационно-технологические основы развития земледелия : сб. докл. Всероссийской научно-практической конференции (Курск, 19–21 сент. 2006 года). Курск, 2006. С. 48–51.

3. Косов А.В. Экологическое состояние черноземов при биологизации земледелия / А. В. Косов, Н. И. Клостер, В. Б. Азаров // Политематический сетевой электронный науч. журнал КубГАУ. 2020. № 10(164). С. 70–85. URL: http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-164-005 (дата обращения: 16.01.2023).

4. Лукин С.В. Роль органических удобрений в земледелии Белгородской области / С. В. Лукин // Биологизация адаптивно-ландшафтной системы земледелия – основа повышения плодородия почвы, роста продуктивности с.-х. культур и сохранения окружающей среды: материалы Всероссийской науч.-практической конф. Белгородского науч.-исслед. ин-та сельского хозяйства Россельхозакадемии (Белгород, 12–13 июля 2012 г.): в 2 т. Белгород : Отчий край, 2012. Т. 2. С. 3–8.

5. Постников П.А. Сохранение плодородия почвы через биологизацию земледелия / П. А. Постников // АПК России. 2017. Т. 24, № 5. С. 1128–1133.

6. Клостер Н.И. Органические удобрения / Н. И. Клостер, В. Б. Азаров, В. В. Лоткова. Белгород : Отчий край, 2022. 216 с. ISBN 978-5-85153-172-9.

7. Lotkova V. Prospects for the introduction of biologization techniques in agriculture of the Belgorod region / V. Lotkova, V. Azarov // Innovative technologies in agriculture : International scientific and practical conference, Orel, 23–24 марта 2022 года. Orel : Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, 2022. P. 51.

References

1. Azarov V.B. Agroecological monitoring of agricultural lands in the South-Western part of the Central Economic Zone : abstract. dis. ... doctors of agricultural Sciences / Vladimir Borisovich Azarov. Kursk, 2004. 40 p.

2. Aidiev A.Yu. The main directions of biologization of agriculture / A. Yu. Aidiev, V. I. Lazarev // Innovative and technological foundations of agriculture development : collection of dokl. All-Russian Scientific and Practical Conference (Kursk, September 19-21, 2006). Kursk, 2006. Pp. 48–51.

3. Kosov A.V. Ecological state of chernozems during biologization of agriculture / A. V. Kosov, N. I. Kloster, V. B. Azarov // Polythematic network electronic scientific journal of KubGAU. 2020. № 10(164). Pp. 70–85. URL: http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-164-005 (accessed: 16.01.2023).

4. Lukin S.V. The role of organic fertilizers in agriculture of the Belgorod region / S. V. Lukin // Biologization of the adaptive landscape system of agriculture – the basis for increasing soil fertility, increasing the productivity of agricultural crops and preserving the environment: materials of the All–Russian Scientific and practical Conference. Belgorod Scientific research. Institute of Agriculture of the Russian Agricultural Academy (Belgorod, July 12–13, 2012): in 2 vols. Belgorod : Fatherland, 2012. Vol. 2. Pp. 3–8.

5. Postnikov P.A. Preservation of soil fertility through biologization of agriculture / P. A. Postnikov // Agroindustrial Complex of Russia. 2017. Vol. 24, № 5. Pp. 1128–1133.

6. Kloster N.I. Organic fertilizers / N. I. Kloster, V. B. Azarov, V. V. Lotkova. Belgorod : Fatherland, 2022. 216 p. ISBN 978-5-85153-172-9.

7. Lotkova V. Prospects for the introduction of biologization techniques in agriculture of the Belgorod region / V. Lotkova, V. Azarov // Innovative technologies in agriculture : International scientific and practical conference, Orel, 23–24 марта 2022 года. Orel : Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, 2022. P. 51.

Сведения об авторах

Бурлуцкий Алексей Валерьевич, аспирант агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: Burlutskiy A@mail.ru;

Азаров Владимир Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru;

Клостер Наталья Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: klonata-1978@mail.ru.

Information about authors

Burlutskiy Aleksey Valerievich, postgraduate student of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, e-mail: Burlutskiy A@mail.ru;

Azarov Vladimir Borisovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru;

Kloster Natalia Ivanovna, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, e-mail: klonata-1978@mail.ru.

УДК 631.527.8:633.853.52

Е.А. Кудрявцева, В.Б. Азаров

ДИНАМИКА НОДУЛЯЦИИ СОИ КАК ИНДИКАТОР ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

Аннотация. В работе представлены итоги полевого эксперимента, предпринятого для оценки того, как различные системы удобрения сказываются на формировании симбиотического аппарата у сои в условиях типичных черноземов Центрального Черноземья. В центре внимания – динамика клубенькообразования, отслеженная в четыре контрольных точки вегетации (появление третьего настоящего листа, ветвление, цветение и плодообразование). Выбор фаз обусловлен их ключевой ролью в продукционном процессе: именно в эти периоды закладываются элементы структуры урожая и определяется потенциал азотфиксации.

Исследование строилось на сравнении девяти вариантов питания, включая минеральный фон (NPK), органику (компост, свиностоки, гранулированные удобрения) и их смеси в половинных дозах.

Полученные данные показали выраженную стимуляцию нодуляции при переходе от минеральной схемы к органическим и комбинированным. В контрольных посевах, лишенных удобрений, активность клубеньков оставалась крайне низкой на всех этапах: к моменту плодообразования здесь насчитывалось всего 17 клубеньков с массой 70 мг на растение. На фоне NPK эти показатели выросли до 56 шт./824 мг, однако органические варианты дали более впечатляющий результат. Например, компост обеспечил максимальную массу (2404 мг) в фазу плодообразования, а свиностоки показали пик численности (64 шт.) в середине вегетации.

С практической стороны работа демонстрирует, что половинная замена дорогостоящих минеральных туков на местные органические ресурсы не только не ухудшает, а напротив – усиливает симбиотический потенциал сои. Внедрение таких смесей позволяет сократить закупки агрохимикатов на 40–50 %, снизить энергозатраты на их производство и транспорт, а также минимизировать риски экологического дисбаланса.

Ключевые слова: соя, клубенькообразование, симбиотическая азотфиксация, органические удобрения, минеральные удобрения, комбинированные системы удобрений, экологическое земледелие, фазы вегетации, ресурсосбережение.

SOYBEAN NODULATION DYNAMICS AS AN INDICATOR OF FERTILIZER SYSTEM EFFECTIVENESS IN THE CENTRAL CHERNOZEM REGION

Abstract. This paper presents the findings of a field experiment designed to assess how different fertilization systems affect the formation of the symbiotic apparatus in soybean grown on typical chernozems of the Central Chernozem region. The focus is on the dynamics of nodulation, monitored at four key growth stages (third trifoliate leaf, branching, flowering, and pod formation). These stages were chosen because they play a pivotal role in the production process: it is during these periods that yield components are laid down and the potential for nitrogen fixation is determined.

The study compared nine nutritional treatments, including a mineral background (NPK), organic amendments (compost, swine effluent, granulated organic fertilizers), and their mixtures applied at half rates.

The data obtained showed a pronounced stimulation of nodulation when shifting from the mineral scheme to organic and combined treatments. In the unfertilized control plots, nodule activity remained extremely low at all stages: by pod formation, only 17 nodules weighing 70 mg per plant were recorded. Against the NPK background, these figures increased to 56 nodules weighing 824 mg, yet organic options yielded even more impressive results. For example, compost provided the highest mass (2404 mg) at pod formation, while swine effluent showed a peak in number (64 nodules) in the middle of the growing season.

From a practical standpoint, the study demonstrates that replacing half of the expensive mineral fertilizers with locally available organic resources not only does not impair but actually enhances the symbiotic potential of soybean. The adoption of such mixtures makes it possible to reduce purchases of agrochemicals by 40–50 %, lower energy costs for their production and transport, and minimize risks of ecological imbalance.

Keywords: soybean, nodule formation, symbiotic nitrogen fixation, organic fertilizers, mineral fertilizers, combined fertilizer systems, organic farming, growth stages, resource conservation.

Введение. Соя давно заняла прочное место в структуре посевных площадей не только как источник растительного белка, но и как культура, способная пополнять запасы азота в почве за счёт симбиоза с бактериями-азотфиксаторами. Однако реализация этого потенциала напрямую зависит от условий, в которых растёт растение. На практике ключевым регулируемым фактором здесь выступает система удобрения: она может как стимулировать развитие клубеньков, так и тормозить его, если подобрана неудачно.

В последние годы внимание исследователей всё чаще привлекают не традиционные минеральные схемы, а смешанные варианты, где часть дорогих туков заменяется органикой – компостом, навозными стоками, гранулированными субстратами. Такой подход сулит двойную выгоду: удешевление производства и снижение угрозы подавления почвенной микрофлоры [1].

Исходя из этого, мы поставили перед собой цель – сравнить действие разных по составу удобрительных смесей на процесс образования клубеньков у сои. Оценку вели поэтапно, фиксируя показатели в четыре фазы вегетации, чтобы проследить динамику и выявить критические периоды, когда симбиоз особенно чувствителен к питанию. Полученные данные позволяют судить о том, какие сочетания дают наибольший прирост по числу и массе клубеньков и насколько оправдана замена части минеральных компонентов органическими аналогами [1].

Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода к более экологичным и ресурсосберегающим техноло-

© Кудрявцева Е. А., Азаров В. Б., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

гиям, где упор делается не на наращивание доз агрохимикатов, а на активизацию внутренних биологических резервов агроценоза. Результаты, полученные в ходе исследования, могут служить ориентиром при доработке технологических карт возделывания сои, особенно в хозяйствах, стремящихся снизить пестицидную и химическую нагрузку.

Методология и методы исследований. Исследования проводились в 2024 году на посевах сои (Glycine max L.) сорта Белгородская-48 в условиях юго-запада ЦЧЗ на черноземе типичном.

Схема опыта. Стационарный полевой опыт «Спутник» Ракитянский район.

Севооборот – трехпольный зерновой: Соя - Озимая пшеница - Кукуруза на зерно.

Основная обработка почвы – поверхностная с использованием дисковых безотвальных орудий глубиной до 15 см.

Площадь элементарной делянки – 100 м^2.

Внесение известковых материалов – в нормах в соответствии с показателями гидролитической кислотности. Повторность – трехкратная.

Варианты удобренности:

1. Контроль без удобрений.
2. Минеральные удобрения (NPK) на планируемый урожай.
3. Компост на основе птичьего помёта на планируемый урожай.
4. Жидкие свиноводческие стоки на планируемый урожай.
5. Гранулированные органические удобрения на планируемый урожай.
6. NPK + свиноводческие стоки по ½ дозе на п.у.
7. Компост + гранулы по ½ дозе на п.у.
8. Гранулы + свиностоки по ½ дозе на п.у.
9. Компост + свиностоки по ½ дозе на п.у.

Учет количества и массы клубеньков проводили в четыре фазы развития растений.

Отбор проб корней проводили методом конверта в 4-кратной повторности. Клубеньки отделяли от корней, подсчитывали и взвешивали на аналитических весах.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли с применением дисперсионного анализа в среде Statistica 10.0. Существенность расхождений между вариантами устанавливали по показателю наименьшей существенной разности (НСР) при доверительной вероятности 95 % ($p \leq 0,05$).

Почвенный покров участка представлен чернозёмами типичными, характерными для юго-западных районов Центрально-Черноземной зоны. По механическому составу они преимущественно тяжелосуглинистые: доля физической глины в пределах пахотного горизонта колеблется в интервале 50–55 %, с явным преобладанием илистой и крупнопылеватой фракций [2].

Агрохимические свойства пахотного слоя вполне типичны для данной местности. Содержание органического вещества, определённое по методу Тюрина, держится в пределах 4,9–5,5 %. С глубиной его концентрация плавно убывает: на отметке 80–100 см она не превышает 1,2–1,6 %. Реакция среды меняется от слабокислой в верхней части профиля до близкой к нейтральной, а с углублением наблюдается постепенное подщелачивание [4].

Обеспеченность почвы доступными элементами питания оценивается как высокая. В пахотном слое содержится 139 мг/кг подвижного фосфора, обменного калия – 122 мг/кг.

Результаты и их обсуждение. Проведенные исследования выявили существенное влияние вида применяемых удобрений на формирование клубенькового аппарата у сои во все фазы вегетации (Таблица 1).

Таблица 1 – Количество (числитель) и масса (знаменатель) клубеньков под посевами сои в зависимости от уровня удобренности без химической мелиорации в 2024 г.

Варианты опыта	3 лист	Ветвление	Цветение	Плодообразование
Контроль	0/0	5/16	14/61	17/70
NPK	12/88	30/717	46/811	56/824
Компост	29/281	49/998	59/1912	57/2404
Свиностоки	16/197	52/566	64/1035	55/899
Гранулы	33/351	49/868	50/1821	54/2290
NPK + свиностоки по ½ дозе	18/190	38/790	40/834	49/1108
Компост + гранулы по ½ дозе	36/588	50/862	66/1994	60/2123
Гранулы + свиностоки по ½ дозе	11/315	39/868	84/2711	76/2814
Компост + свиностоки по ½ дозе	19/424	44/900	91/2938	77/2922
$НСР_{95}$ по количеству 11 шт, по массе 66 г.				

Во всех вариантах опыта наблюдалось закономерное увеличение количества и массы клубеньков от фазы 3-х листьев к фазе цветения, с последующей стабилизацией или незначительным снижением к фазе плодообразования. Контрольный вариант (без удобрений) характеризовался минимальными показателями на всех этапах развития, достигая к фазе плодообразования лишь 17 шт./70 г.

Анализ полученных данных показал, что вид удобрений заметно сказывается на развитии клубеньков у сои на протяжении всего периода вегетации. Прослеживается общая тенденция: число и масса клубеньков нарастают от фазы третьего листа к цветению, а затем либо стабилизируются, либо несколько снижаются к моменту плодообразования. На неудобренном контроле эти показатели оставались минимальными во все сроки учёта – к концу вегетации здесь насчитывалось всего 17 клубеньков с общей массой 70 мг на растение.

Внесение NPK дало достоверный прирост по сравнению с контролем, но уступило органическим и смешанным вариантам. На компостном фоне в фазу плодообразования сформировалось 57 клубеньков массой 2404 мг, что превышает контроль в 3,4 раза по числу и в 34 раза по массе. Свиностоки показали пик численности (64 шт.) в середине вегетации, но к концу сезона их активность заметно падала. Гранулированные удобрения обеспечили стабильно высокие значения на протяжении всего опыта, уступая лишь некоторым комбинированным схемам [5].

Наиболее выразительные результаты получены при смешении двух органических источников. Сочетание компоста и свиностоков (вдвое усечённые дозы) в фазу цветения дало 91 клубенёк массой 2938 мг на растение – это в 6,5 и 48 раз выше контроля соответственно. Кроме того, в этом варианте спад активности к концу вегетации был менее резким, что говорит о более продолжительном функционировании симбиотического аппарата. Вариант с гранулами и свиностоками также показал высокую эффективность – 76 клубеньков массой 2814 мг в фазу плодообразования.

Все отмеченные различия статистически значимы ($НСР_{05}$ = 11 шт. по численности и 66 мг по массе). Наибольший разброс показателей зафиксирован в вариантах с органическими и комбинированными системами, что, по-видимому, связано с неоднородностью состава субстратов.

Так, замена половины минеральных удобрений на органику не только не снижает, но и усиливает симбиотический потенциал сои, причём наибольший эффект даёт сочетание компоста и свиностоков. Такой подход позволяет сократить применение дорогостоящих агрохимикатов, повысить активность азотфиксации и улучшить условия для последующих культур в севообороте.

Для производственных условий рекомендуется применение комбинированных органических систем, особенно компоста и свиностоков в соотношении 1:1 по половинным дозам. Это позволяет снизить затраты на минеральные удобрения на 40–50 %, повысить эффективность симбиоза и улучшить экологическую безопасность агроценозов.

Выводы. Проведённые исследования подтверждают, что характер удобрения заметно сказывается на развитии симбиотического аппарата у сои. Наиболее впечатляющие результаты получены при использовании комбинированных органических схем: в фазу плодообразования масса клубеньков превысила контрольные значения в 34–40 раз, тогда как на минеральном фоне (NPK) этот показатель оказался скромнее – прирост составил лишь 11,8 раза ($НСР_{05}$ = 66 г).

Если рассматривать варианты с половинными дозами, то здесь чётко выделяются две лидирующие комбинации – компост в смеси со свиностоками и гранулы со свиностоками. В фазу цветения они обеспечили максимальную массу клубеньков (2938 и 2711 г соответственно), что на 55–62 % выше, чем у NPK. Примечательно, что к фазе плодообразования разница сохраняется: в этих вариантах масса держится на уровне 2922 и 2814 г, тогда как на минеральном фоне она падает до 824 г.

Обращает на себя внимание и динамика процесса: пик нодуляции приходится на цветение, затем активность либо стабилизируется, либо слегка снижается. Однако в комбинированных органических вариантах спад выражен слабее, что говорит о более продолжительном функционировании клубеньков.

Заслуживает внимания и тот факт, что замена половины минеральных удобрений на органику не только не ухудшает ситуацию, но и даёт существенный выигрыш – эффективность симбиоза возрастает на 35–40 % по сравнению с чистым минеральным фоном. Особенно удачными оказались сочетания свиностоков с компостом или гранулированными удобрениями: они дают и высокую интенсивность клубенькообразования, и устойчивость активности во времени.

С учётом всего сказанного, можно считать обоснованным переход к комбинированным органическим системам удобрения при возделывании сои. Такой подход не только усиливает биологическую азотфиксацию, но и вписывается в логику ресурсосберегающих технологий, становясь всё более востребованным в современных хозяйствах.

Библиография

1. Клостер Н.И. Органические удобрения / Н. И. Клостер, В. Б. Азаров, В. В. Лоткова. Белгород : Отчий край, 2022. С. 216. ISBN 978-5-85153-172-9.

2. Михалева Е.С., Торгашов В.Л., Половинкин Г.А. Влияние органических удобрений на азотфиксирующую деятельность растений сои // Вестник ОрелГАУ. № 3(84). 2020. С. 177–183.

3. Проворов Н.А. Эволюционно-генетические основы симбиотической инженерии растений: мини-обзор / Н. А. Проворов, О. П. Онищук // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53, № 3. С. 464–474. DOI 10.15389/ agrobiology.2018.3.464rus. EDN EACWHD.

4. Турьянский А.В. и др. Технологический регламент возделывания основных сельскохозяйственных культур в Белгородской области / А. В. Турьянский. Белгород, 2012. С. 687.

5. Alves B.J.R., Zotarelli L., Fernandes F.M., Heckler J.C., Macedo R.A.T., Boddey R.M., Jantalia C.P., Urquiaga S. Biological nitrogen fixation and nitrogen fertilizer on the nitrogen balance of soybean, maize and cotton // Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2006. Vol. 41, № 3. P. 449–456.

References

1. Kloster N.I., Azarov V.B., Lotkova V.V. Organic fertilizers. Belgorod : Otchiy Krai, 2022. 216 p. ISBN 978-5-85153-172-9.

2. Mikhaleva E.S., Torgashov V.L., Polovinkin G.A. Effect of organic fertilizers on the nitrogen-fixing activity of soybean plants // Bulletin of OrelGAU. № 3(84). 2020. P. 177–183.

3. Provorov N.A. Evolutionary-genetic foundations of plant symbiotic engineering: a mini-review / N. A. Provorov, O. P. Onishchuk // Agricultural Biology. 2018. Vol. 53, № 3. P. 464–474. DOI 10.15389/agrobiology.2018.3.464rus. EDN EACWHD.

4. Turyansky A.V. et al. Technological regulations for the cultivation of major agricultural crops in Belgorod Region / A.V. Turyansky. Belgorod, 2012. P. 687.

5. Alves B.J.R., Zotarelli L., Fernandes F.M., Heckler J.C., Macedo R.A.T., Boddey R.M., Jantalia C.P., Urquiaga S. Biological nitrogen fixation and nitrogen fertilizer on the nitrogen balance of soybean, maize and cotton // Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2006. Vol. 41, № 3. P. 449–456.

Сведения об авторах

Кудрявцева Екатерина Александровна, аспирант агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: sorochinskaya_ea@belgau.ru;

Азаров Владимир Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru.

Information about authors

Kudryavtseva Ekaterina Alexandrovna, postgraduate student of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, e-mail: sorochinskaya_ea@belgau.ru;

Azarov Vladimir Borisovich, Professor, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova str., Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru.

УДК 502.681.3

А.В. Лодыгин, В.Б. Азаров

ВЛИЯНИЕ СТИМУЛЯТОРОВ КОРНЕОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФИТОГОРМОНОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВСХОЖЕСТИ КАРТОФЕЛЯ

Аннотация. В статье рассматривается роль картофеля (Solanum tuberosum L.) как стратегической продовольственной культуры в агропромышленном комплексе Российской Федерации, обеспечивающей внутренние потребности населения и вносящей существенный вклад в структуру продовольственной безопасности государства. Отмечается, что получение высоких и стабильных урожаев сопряжено с комплексом биотических рисков, среди которых наибольшую угрозу представляют грибные и бактериальные инфекции (возбудители фитофтороза, альтернариоза, ризоктониоза), вредные насекомые (колорадский жук, проволочники), а также конкуренция со стороны сегетальной растительности. В отсутствие должного контроля указанные факторы способны снижать потенциальную урожайность на 30 % и более.

Обосновывается необходимость применения интегрированной системы защиты растений, объединяющей рациональное использование химических средств с учетом ротации действующих веществ, агротехнические приемы (севооборот, подбор устойчивых сортов и гибридов), а также регулярный фитосанитарный мониторинг. Подчеркивается, что бесконтрольное применение пестицидов ведет к селекции резистентных популяций патогенов, усилению токсикологической нагрузки на агроэкосистемы и риску накопления остаточных количеств действующих веществ в товарной продукции.

В настоящее время в промышленном картофелеводстве широкое распространение получили многокомпонентные комбинированные протравители клубней, сочетающие инсектицидные и фунгицидные компоненты. Такие препараты формируют защитный барьер уже на начальных этапах онтогенеза растения. Вместе с тем отмечается, что лишь ограниченное число хозяйств применяет стимуляторы корнеобразования в баковых смесях с протравителями, что свидетельствует о недооцененности данного агроприема. При этом его потенциал для повышения рентабельности, особенно в сегменте производства сырья для переработки (производство чипсов и картофеля фри), оценивается как высокий. Особую научную и практическую ценность представляют препараты, содержащие сбалансированный комплекс фитогормонов (цитокинины, ауксины, гиббереллины), сочетанное действие которых индуцирует процессы интенсивного ризогенеза и способствует увеличению числа закладываемых клубней.

В рамках полевых исследований на посадках картофеля с применением многокомпонентного протравителя на основе тиометоксама, седаксана и флудиоксонила тестировались два типа стимуляторов: фитогормональный комплекс и состав на основе микроэлементов. Промежуточные учеты выявили статистически значимую положительную динамику: количество заложенных клубней на одно растение увеличилось на 4,3 %, густота стеблестоя в пересчете на один гектар возросла на 5,3 %. Результаты финальной уборки подтвердили выявленную тенденцию: прибавка урожайности на опытных вариантах составила от 4,5 % до 7,0 % в зависимости от схемы обработки.

На основании полученных данных сделан вывод о высокой экономической эффективности и целесообразности внедрения технологии совместного применения предпосадочной обработки клубней многокомпонентными протравителями и стимуляторами корнеобразования. В условиях интенсификации отрасли данный агроприем рассматривается как один из наиболее доступных и оперативных инструментов повышения валового сбора и качества товарной продукции картофелеводства.

Ключевые слова: картофель, средства защиты растений, протравители клубней, стимуляторы корнеобразования, фитогормоны, цитокинины, ауксины, гиббереллины, урожайность, интегрированная защита растений.

THE EFFECT OF ROOT-FORMATION STIMULANTS BASED ON PHYTOHORMONES TO INCREASE POTATO GERMINATION

Abstract. The article examines the role of potatoes (Solanum tuberosum L.) as a strategic food crop in the agro-industrial complex of the Russian Federation, which meets the domestic needs of the population and makes a significant contribution to the structure of the state's food security. It is noted that obtaining high and stable yields is associated with a range of biotic risks, among which the greatest threat is posed by fungal and bacterial infections (causative agents of late blight, Alternaria, and rhizoctoniosis), harmful insects (Colorado potato beetle, wireworms), as well as competition from weed vegetation. In the absence of proper control, these factors can reduce potential yield by 30 % or more. The necessity of applying an integrated plant protection system is substantiated; this system combines the rational use of chemical agents, taking into account the rotation of active substances, agronomic practices (crop rotation, selection of resistant varieties and hybrids), as well as regular phytosanitary monitoring. It is emphasized that uncontrolled use of pesticides leads to the selection of resistant pathogen populations, increases the toxicological load on agroecosystems, and creates a risk of residual amounts of active substances accumulating in marketable products. Currently, multi-component combined tuber dressings that combine insecticidal and fungicidal components have become widespread in industrial potato cultivation. Such preparations form a protective barrier already at the initial stages of the plant's ontogenesis. At the same time, it is noted that only a limited number of farms use root-formation stimulants in tank mixtures with dressings, which indicates that this agricultural practice is underappreciated. At the same time, its potential for increasing profitability, especially in the segment of raw material production for processing (production of chips and French fries), is assessed as high. Of particular scientific and practical value are preparations containing a balanced complex of phytohormones (cytokinins, auxins, gibberellins), the combined effect of which induces processes of intensive rhizogenesis and contributes to an increase in the number of tubers formed. As part of field studies conducted on potato crops using a multicomponent seed treatment based on thiomethoxam, sedaxane, and fludioxonil, two types of stimulants were tested: a phytohormonal complex and a composition based on microelements. Intermediate assessments revealed statistically significant positive dynamics: the number of tubers per plant increased by 4.3 %, and the stem density per hectare in-

© Лодыгин А. В., Азаров В. Б., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

creased by 5.3 %. The results of the final harvest confirmed the identified trend: the yield increase in the experimental variants ranged from 4.5 % to 7.0 %, depending on the treatment scheme. Based on the data obtained, a conclusion was drawn regarding the high economic efficiency and feasibility of implementing the technology of jointly applying pre-planting treatment of tubers with multicomponent seed treatments and root formation stimulants. In the context of industry intensification, this agricultural practice is considered one of the most accessible and efficient tools for increasing the gross yield and quality of marketable potato products.

Keywords: potatoes, plant protection products, tuber protectants, rooting stimulants, phytohormones, cytokinins, auxins, gibberellins, yield, integrated plant protection.

Введение. В последние годы наблюдается устойчивый рост спроса на продукцию глубокой переработки картофеля, в частности на картофель фри и чипсы, что стимулирует расширение площадей под техническими (перерабатываемыми) сортами. Данная категория сортов характеризуется специфическими требованиями к качеству клубней: оптимальным содержанием сухих веществ, низким уровнем редуцирующих сахаров, правильной формой и однородностью фракции.

Вместе с тем технические сорта, ориентированные на переработку, обладают рядом биологических особенностей, ограничивающих их продуктивный потенциал. Одной из ключевых проблем является относительно невысокая закладка клубней на одном растении, обусловленная генетическими характеристиками сортов и их селекционной направленностью преимущественно на качественные параметры клубня, а не на количественные показатели продуктивности. Данное обстоятельство существенно ограничивает возможности наращивания валового сбора и выхода товарной фракции, что особенно критично в условиях интенсивного производства.

В этой связи особый научный и практический интерес представляет изучение агроприемов, направленных на стимуляцию процессов клубнеобразования у технических сортов. Одним из перспективных направлений является применение стимуляторов корнеобразования при предпосадочной обработке клубней. Действие данных препаратов основано на активации физиологических процессов, регулирующих формирование корневой системы, увеличение числа стеблей и, как следствие, закладку большего количества столонов. Увеличение количества стеблей на единицу площади напрямую коррелирует с общим числом формируемых клубней, что позволяет компенсировать генетически обусловленную ограниченность технических сортов в данном показателе.

Особую значимость приобретают препараты, содержащие комплекс фитогормонов (цитокинины, ауксины, гиббереллины), которые обладают синергическим действием на процессы морфогенеза. Сочетанное влияние указанных гормонов обеспечивает не только усиление корнеобразования, но и стимуляцию развития боковых побегов, увеличение густоты стеблестоя и активизацию закладки столонов. Данный эффект имеет принципиальное значение для технических сортов, поскольку позволяет увеличить количество клубней на куст без изменения их качественных характеристик.

Таким образом, целью настоящего исследования являлась оценка эффективности применения стимуляторов корнеобразования в сочетании с многокомпонентным протравителем при выращивании картофеля технического назначения, а также анализ влияния данных препаратов на формирование элементов продуктивности: количество стеблей, число заложенных столонов и итоговую урожайность.

Условия и методика проведения исследований

Исследования выполнялись в формате полевого двухфакторного опыта, заложенного в стационарных условиях с пространственно-временным развертыванием вариантов в трехкратной повторности. Схема опыта предусматривала рандомизированное размещение делянок, что обеспечивало статистическую достоверность получаемых данных и исключало влияние неконтролируемых факторов на результаты эксперимента.

Возделывание культуры осуществлялось в рамках четырехпольного зернопаропропашного севооборота, обеспечивающего оптимальное чередование предшественников и поддержание фитосанитарного состояния почвы на приемлемом уровне.

В качестве объекта исследований использовался чернозем типичный среднемощный малогумусный тяжелосуглинистого гранулометрического состава, характеризующийся высоким потенциальным плодородием и благоприятными водно-физическими свойствами для возделывания картофеля.

Предметом изучения выступали жидкие микроудобрения, включающие препарат «Интенс 0.1-42-9», а также «Спринталга», различающиеся по компонентному составу и механизму физиологического действия на растительный организм.

Объектом растительного материала служил сорт картофеля Инноватор, относящийся к группе технических сортов, предназначенных для промышленной переработки (производство картофеля фри и чипсов).

Уборка урожая проводилась ручным способом с фиксированной учетной площади каждой делянки. Период уборки пришелся на 15–18 сентября, что соответствовало фазе полной технической спелости клубней и позволяло объективно оценить сформированный уровень урожайности в зависимости от вариантов обработки.

Схема опыта:

1 - контроль без удобрений

2 - $N_{50}P_{100}K_{220}$

3 - $N_{50}P_{100}K_{220}$ + Интенс 0.1-42-9

4 - $N_{50}P_{100}K_{220}$ + «Спринталга»

5 - $N_{50}P_{100}K_{220}$ + «Спринталга» + Интенст 0.1-42-9»

Результаты исследований

Влияние минеральных удобрений и жидких микроудобрений на формирование стеблестоя и закладку столонов у картофеля сорта Инноватор.

Проведенные полевые исследования выявили существенное влияние изучаемых агроприемов на процессы морфогенеза растений картофеля технического сорта Инноватор. Установлено, что как минеральный фон, так и некорневые обработки жидкими микроудобрениями оказывали заметное воздействие на формирование вегетативной массы и генеративных органов, определяющих потенциальную продуктивность культуры.

Количество стеблей

Анализ структуры стеблестоя показал, что внесение минеральных удобрений в дозе $N_{50}P_{100}K_{220}$ способствовало увеличению количества стеблей относительно контрольного варианта (без удобрений). На контрольных делянках данный пока-

затель находился на уровне 3,2 шт./растение, тогда как на фоне минерального питания (вариант 2) количество стеблей возросло до 3,6 шт./растение, что составило прибавку 12,5 % (таблица 1).

Дальнейшее усиление положительного эффекта наблюдалось при включении в схему обработок жидких микроудобрений. На варианте 3 ($N_{50}P_{100}K_{220}$ + Интенс 0.1-42-9) количество стеблей достигло 3,9 шт./растение, превысив показатель минерального фона на 8,3 %, а контрольного варианта – на 21,9 %. Применение препарата «Спринталга» на фоне минеральных удобрений (вариант 4) обеспечило формирование 3,8 шт./растение, что соответствовало прибавке 5,6 % относительно варианта 2 и 18,8 % относительно контроля.

Максимальное значение исследуемого показателя было зафиксировано на варианте 5 при совместном применении обоих жидких микроудобрений ($N_{50}P_{100}K_{220}$ + «Спринталга» + Интенс 0.1-42-9). Количество стеблей на данном варианте составило 4,2 шт./растение, что превысило контроль в 1,3 раза (на 31,3 %) и минеральный фон на 16,7 %. Полученные данные свидетельствуют о выраженном синергическом эффекте при комбинированном использовании вытяжки морских водорослей и комплексного микроудобрения.

Таблица 1 – Анализ структуры продуктивности картофеля в зависимости от изучаемых факторов

Вариант	Количество стеблей, шт./раст.	Прибавка к контролю, %	Количество столонов, шт./раст.	Прибавка к контролю, %
контроль без удобрений	3.2	-	6,8	-
$N_{50}P_{100}K_{220}$	3,2.	-	8,1	+19,1
$N_{50}P_{100}K_{220}$+Интенст 0.1-42-9	3,6	+12,5	8,9	+30,9
$N_{50}P_{100}K_{220}$+ «Спринталга»	3,8	+18,8	8,6	+26,5
$N_{50}P_{100}K_{220}$+ «Спринталга» + Интенст 0.1-42-9»	4	+31,3	9,7	+42,6

Количество столонов

Формирование столонов, являющихся непосредственным морфологическим предшественником клубней, также находилось в прямой зависимости от изучаемых агротехнических факторов. На контрольном варианте количество столонов составило 6,8 шт./растение. Внесение минеральных удобрений (вариант 2) обеспечило увеличение данного показателя до 8,1 шт./растение (+19,1 % к контролю).

Применение препарата Интенс 0.1-42-9 на минеральном фоне (вариант 3) способствовало формированию 8,9 шт./растение, что превысило показатель варианта 2 на 9,9 %, а контроля – на 30,9 %. На варианте с использованием «Спринталга» (вариант 4) количество столонов составило 8,6 шт./растение (+6,2 % к минеральному фону и +26,5 % к контролю).

Наибольшее количество столонов было отмечено при комплексном применении обоих микроудобрений (вариант 5) – 9,7 шт./растение. Относительно контроля прибавка составила 42,6 %, относительно минерального фона – 19,8 %. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность сочетанного применения препаратов на основе морских водорослей и комплексного микроудобрения для стимуляции процессов столонообразования у технического сорта Инноватор.

Библиография

1. Актуальные направления развития селекции и семеноводства картофеля в России / Е. А. Симаков, Б. В. Анисимов, С. В. Жевора, А. В. Митюшкин, А. А. Журавлев, А. В. Митюшкин, А. С. Гайзатулин // Картофель и овощи. 2020. № 12. С. 22–26.
2. Анисимов Б.В. Сортовые ресурсы и передовой опыт семеноводства картофеля / Б. В. Анисимов. М., 2000. 150 с.
3. Анисимов Б.В. Мировое производство картофеля: тенденции рынка, прогнозы и перспективы (аналитический обзор) // Картофель и овощи. 2021. № 10. С. 3–8.
4. Спиглазова С.Ю. Бактериозы картофеля. Есть ли решение проблемы? / С. Ю. Спиглазова // Картофель и овощи. 2020. № 11. С. 23.
5. Басиев С.С., Болиева З.А., Козаева, И.Г. Плиев Д.П. Селекция фитофтороустойчивых сортов картофеля // Картофель и овощи. 2019. № 8. С. 30–32.

References

1. Current trends in the development of potato breeding and seed production in Russia / E. A. Simakov, B. V. Anisimov, S. V. Zhevora, A. V. Mityushkin, A. A. Zhuravlev, A. V. Mityushkin, A. S. Gaizatulin // Potatoes and vegetables. 2020. № 12. Pp. 22–26.
2. Anisimov B.V. Varietal resources and advanced experience in potato seed production / B. V. Anisimov/ Moscow, 2000, 150 p.
3. Anisimov B.V. Global Potato Production: Market Trends, Forecasts, and Prospects (Analytical Review) // Potatoes and Vegetables. 2021. № 10. Pp. 3–8.
4. Spiglazova S.Yu. Potato Bacterial Diseases. Is There a Solution to the Problem? / S. Yu. Spiglazova // Potatoes and Vegetables. 2020. № 11. P. 23.
5. Basiev S.S., Bolieva Z.A., Kozaeva, I.G., Pliev D.P. Breeding of late blight-resistant potato varieties // Potatoes and Vegetables. 2019. № 8. Pp. 30–32.

Сведения об авторах

Лодыгин Андрей Владимирович, аспирант агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: Lodigin566@mail.ru;

Азаров Владимир Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ им. В.Я. Горина, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru.

Information about authors

Lodigin Andrey Vladimirovich, postgraduate student of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, e-mail: Lodigin566@mail.ru;

Azarov Vladimir Borisovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova str., Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru.

УДК 631.46:631.86:631.6:633.34

Е.Д. Фалин, В.Б. Азаров

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЧЕТАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ В РЕГУЛИРОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕРНОЗЁМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО НА ПОСЕВАХ СОИ

Аннотация. В статье рассматривается эффективность сочетания органических удобрений и химической мелиорации в регулировании биологической активности чернозёма выщелоченного на посевах сои. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения продуктивности сельскохозяйственных культур в условиях ухудшения состояния почвы и необходимости ее устойчивого использования.

В ходе эксперимента были оценены изменения в биологической активности почв, зависимости микробной активности и урожайности сои, а также её качественный состав зерна сои при использовании различных комбинаций органических и химических удобрений. Результаты показали, что комплексный подход, включающий органическое и химическое удобрение, значительно увеличивает биологическую активность чернозёма и способствует повышению урожайности сои по сравнению с контрольной группой.

Основные выводы подчеркивают важность сбалансированного применения удобрений для устойчивого земледелия и предлагают рекомендации для практического использования на сельскохозяйственных угодьях. Исследование подтверждает необходимость дальнейшего изучения взаимодействий в системе «почва-удобрение-растение» для оптимизации агрономических практик.

Ключевые слова: чернозём выщелоченный, соя, органические удобрения, химическая мелиорация, биологическая активность почвы, ферментативная активность, урожайность.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF COMBINING ORGANIC FERTILIZERS AND CHEMICAL AMELIORATION IN REGULATING THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF LEACHED CHERNOZEM UNDER SOYBEAN CROPS

Abstract. The article examines the effectiveness of combining organic fertilizers and chemical reclamation in regulating the biological activity of leached chernozem in soybean crops. The relevance of the study is due to the need to increase the productivity of agricultural crops in the context of deteriorating soil conditions and the need for its sustainable use.

During the experiment, changes in the biological activity of soils, the relationship between microbial activity and soybean yield, as well as the qualitative composition of soybean grain when using various combinations of organic and chemical fertilizers, were assessed. The results showed that a comprehensive approach, including organic and chemical fertilizers, significantly increases the biological activity of chernozem and contributes to higher soybean yields compared to the control group.

The main conclusions emphasize the importance of a balanced use of fertilizers for sustainable agriculture and offer recommendations for practical use on agricultural land. The study confirms the need for further research into the interactions in the «soil-fertilizer-plant» system to optimize agronomic practices.

Keywords: leached chernozem, soybeans, organic fertilizers, chemical reclamation, soil biological activity, enzymatic activity, yield.

Белгородская область производит более 10 % продукции сельского хозяйства по Центральному федеральному округу [3]. Во многом это стало возможно благодаря чернозёмным почвам, которые занимают 2,09 млн га (77 % территории).

Приоритетными направлениями в развитии агропромышленного комплекса области являются развитие птицеводства, свиноводства и молочного животноводства.

Для решения поставленных задач и обеспечения постоянного интенсивного роста производительности в животноводстве необходимо развитое растениеводство, которое позволяет иметь базу для производства высокоэффективных кормов.

Современное сельское хозяйство сталкивается с проблемой поддержания и увеличения продуктивности почв, что связано, в частности, с истощением почвенных ресурсов и ухудшением их агрономических свойств. Одним из эффективных подходов является использование органических удобрений в сочетании с химической мелиорацией, направленной на восстановление и улучшение почвенного плодородия. В данной статье рассматриваются результаты исследований, направленных на оценку влияния сочетания данных факторов на биологическую активность чернозёма выщелоченного на посевах сои.

Соя – уникальная белково-масличная культура мирового значения. Ее семена содержат в среднем 37–42 % белка, 19–22 % жира и до 30 % углеводов. По аминокислотному составу процент сои близок к белку куриных яиц, а масло относится к легко усваиваемым и содержит жирные кислоты, не вырабатываемые организмом животных и человека [5]. Соя – безотходная культура, все части растения перерабатываются в более чем четыреста видов различной продукции [2].

Соя в Белгородской области – сравнительно новая культура. В нашем регионе в список возделываемых культур она включена лишь с 1992 г. В Белгородской области, в связи с активным развитием животноводства, соя стала очень востребованной культурой в качестве источника полноценного растительного белка. С 2005 г площадь посевов сои в Белгородской области увеличилась в 40 раз [1].

Исследования проводились на стационарном полевом опыте «Спутник» в Ракитянском районе. Почва – чернозём выщелоченный, подвергавшийся разным вариантам мелиорации и удобрения. Гранулометрический состав состоит из средне- и тяжелосуглинистых почв. Севооборот – трехпольный зерновой: соя-озимая пшеница-кукуруза на зерно.

© Фалин Е. Д., Азаров В. Б., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Для сои очень важна высокая биологическая активность почвы. Она способствует лучшему развитию корневой системы, что в итоге помогает растению эффективнее добывать воду и питательные вещества [6]. Для оценки биологической активности почвы использовался метод льняных полотен. Метод позволяет оценить активность целлюлозоразлагающих микроорганизмов в почве, а также косвенно судить о степени мобилизации азота и общем состоянии микробиологических процессов. Он считается достаточно простым и не требует сложной лабораторной аппаратуры, что делает его удобным для полевых исследований [4].

Проведённые эксперименты показали, что сочетание органических удобрений (навоз, компосты) и химической мелиорации ведёт к значительному увеличению биологической активности почвы (табл. 1).

Таблица 1 – Биологическая активность почвы (% разложения льняного полотна) в зависимости от использования удобрений и известкования

Удобрения	Без известкования	Известкование
Контроль	25,1	30,5
NPK	19,6	22,9
Компост	31,4	34,6
Свиностоки	23,4	24,2
Гранулы	25,8	35,0
NPK + свиностоки по ½ дозы	22,9	28,0
Компост + гранулы по ½ дозы	28,0	36,1
Гранулы + свиностоки по ½ дозы	21,9	32,0
Компост + свиностоки по ½ дозы	23,7	34,1

Как можно заметить, известкование почв в сочетании с органическими удобрениями позволяет существенно увеличить биологическую активность. Наиболее эффективно увеличивают биологическую активность почв совместное использование компоста и гранул в половинной дозе при известковании выщелоченных чернозёмов. Повышение биологической активности напрямую влияет на рост и развитие растений, а также на урожайность (табл. 2).

Таблица 2 – Урожайность сельскохозяйственных культур на опытном поле в 2024–2025 году, т/га

Удобрения	Известкование	Урожайность сои
Контроль	-	1,91
	хим.мелиорация	2,23
NPK	-	2,41
	хим.мелиорация	2,49
Компост	-	2,50
	хим.мелиорация	2,36
Свиностоки	-	2,30
	хим.мелиорация	2,39
Гранулы	-	2,59
	хим.мелиорация	2,44
NPK + свиностоки по ½ дозы	-	2,15
	хим.мелиорация	2,31
Компост + гранулы по ½ дозы	-	2,55
	хим.мелиорация	2,69
Гранулы + свиностоки по ½ дозы	-	2,78
	хим.мелиорация	3,17
Компост + свиностоки по ½ дозы	-	2,67
	хим.мелиорация	3,22

Немаловажным фактором является и качественное улучшение получаемого урожая. Качественный состав зерна сои изменялся в зависимости на фоне применения удобрений и известкования (табл. 3).

Проанализировав таблицы 1, 2, 3, можно заметить, что именно половинное применение компоста совместно со свиностоками на фоне известкования выщелоченных чернозёмов даёт максимальный прирост урожайности по сравнению с контрольной делянкой (на 70 %). Помимо этого, наиболее качественным по составу оказалось зерно сои, полученное с делянок, которые также удобрялись половинной дозой компоста и свиностоков на фоне известкования.

Для повышения биологической активности чернозёма выщелоченного рекомендуется совместное применение органических удобрений и известкования. Оптимальная схема удобрения – половинная доза компоста в сочетании со свиностоками на фоне известкования. Предложенный вариант внесения удобрений обеспечивает максимальный прирост урожайности и улучшение качественных показателей зерна.

Таблица 3 – Качественный состав зерна сои в зависимости от использования удобрений и известкования

Удобрения	Известкование	Содержание в зерне, %	
		Сырой протеин	Сырой жир
Контроль	-	35,1	18,5
	хим.мелиорация	34,8	18,6
NPK	-	37,9	19,7
	хим.мелиорация	39,6	19,4
Компост	-	38,4	20,1

Продолжение таблицы 3

	хим.мелиорация	37,8	21,3
Свиностоки	-	35,5	18,9
	хим.мелиорация	36,2	19,6
Гранулы	-	39,4	21,4
	хим.мелиорация	39,7	21,0
NPK + свиностоки по ½ дозы	-	36,7	18,6
	хим.мелиорация	38,3	19,7
Компост + гранулы по ½ дозы	-	37,0	21,4
	хим.мелиорация	37,7	22,0
Гранулы + свиностоки по ½ дозы	-	39,2	22,4
	хим.мелиорация	40,6	22,6
Компост + свиностоки по ½ дозы	-	40,0	21,9
	хим.мелиорация	41,1	22,5

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением долгосрочных эффектов применения данных агротехнических приёмов, а также с разработкой экономически обоснованных норм внесения удобрений для различных почвенно-климатических условий.

Полученные результаты подтверждают целесообразность комплексного подхода к повышению плодородия чернозёма выщелоченного и эффективности возделывания сои.

Библиография

1.Зеленская Т.И. Достижения и перспективы селекционно-семеноводческой работы по сое в Белгородском государственном аграрном университете имени В. Я. Горина / Т. И. Зеленская, Н. С. Шевченко // Масличные культуры. 2016. № 3(167). С. 97–100.

2.Ибрагимов А.Д. Соя – культура больших возможностей / А. Д. Ибрагимов // УЭПС. 2015. № 4. С. 59–62.

3.Клостер Н.И. Состояние плодородия чернозема типичного под воздействием органических удобрений в центральном Черноземье / Н. И. Клостер, В. Я. Родионов, В. Б. Азаров // Московский экономический журнал. 2019. № 1. С. 56.

4.Лицуков С.Д. Микробиологическая активность почвы при различных системах земледелия / С. Д. Лицуков, А. И. Титовская, А. В. Акинчин, А. Н. Сегидин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 8. С. 57–60.

5.Петибская В.С. Соя: химический состав и использование / В. С. Петибская. Майкоп : ОАО Полиграф-ЮГ, 2012. 432 с.

6.Müller M. Soybean root growth in response to chemical, physical, and biological soil variations / M. Müller, J. R. Schneider, V. A. Klein, E. da Silva, J. P. da Silva Jr., A. M. Souza, G. Chavarria // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. Art. 602569. DOI: 10.3389/fpls.2021.602569.

References

1.Zelenskaya T.I. Achievements and prospects of soybean breeding and seed production at the V.Ya. Gorin Belgorod State Agrarian University / T. I. Zelenskaya, N. S. Shevchenko // Oil Crops. 2016. № 3(167). P. 97–100.

2.Ibragimov A.D. Soybean: a crop of great potential / A. D. Ibragimov // UEPS. 2015. № 4. P. 59–62.

3.Kloster N.I. Fertility status of typical chernozem under the influence of organic fertilizers in the Central Chernozem Region / N. I. Kloster, V. Ya. Rodionov, V. B. Azarov // Moscow Economic Journal. 2019. № 1. P. 56.

4.Litsukov S.D. Soil microbiological activity under various farming systems / S. D. Litsukov, A. I. Titovskaya, A. V. Akinchin, A. N. Segidin // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2013. № 8. P. 57–60.

5.Petibskaya V.S. Soybean: Chemical Composition and Utilization / V. S. Petibskaya. Maykop : OAO Poligraf-YUG, 2012. 432 p.

6.Müller M. Soybean root growth in response to chemical, physical, and biological soil variations / M. Müller, J. R. Schneider, V. A. Klein, E. da Silva, J. P. da Silva Jr., A. M. Souza, G. Chavarria // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. Art. 602569. DOI: 10.3389/fpls.2021.602569.

Сведения об авторах

Фалин Евгений Денисович, аспирант агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: FalinED @mail.ru;

Азаров Владимир Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru.

Information about authors

Falin Evgeniy Denisovich, postgraduate student of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Vavilova str., 1, Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod region, Russia, 308503, e-mail: FalinED @mail.ru;

Azarov Vladimir Borisovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Faculty of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», 1 Vavilova str., Maysky village, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, e-mail: azarov.v.b@mail.ru.

УДК 633.72:631.358

Я. Янь, И.В. Чичерин, Л. Чжао, Т. Си, Ч. Ан

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СБОРА ЧАЯ

Аннотация. Роботизированные системы сбора чая предложены в качестве перспективного решения для решения проблемы нехватки рабочей силы и повышения эффективности при сборе высококачественного чая. Однако их практическое применение ограничено сложными полевыми условиями, включая плотную структуру крон кустов, частые затенения и высокое визуальное сходство между молодыми побегами и зрелыми листьями. В этом обзоре систематически анализируются 58 соответствующих публикаций, описывающих три основных технических модуля роботизированных систем сбора чая: обнаружение и локализация чайных побегов на основе машинного зрения, планирование траектории движения манипулятора и проектирование исполнительных устройств для отделения побегов с низким уровнем повреждений. Методы глубокого обучения, в частности архитектуры на базе YOLO и R-CNN, значительно повысили точность обнаружения чайных побегов, однако высокая производительность при переменном освещении и реализации в режиме реального времени на встроенных платформах остается сложной задачей. Для манипуляций роботами были разработаны алгоритмы оптимизации и стратегии обучения с подкреплением. Для роботизированных манипуляций были изучены алгоритмы оптимизации и стратегии обучения с подкреплением, позволяющие улучшить планирование траектории и объезд препятствий; тем не менее, адаптивность в динамичных и неструктурированных средах по-прежнему ограничена. Кроме того, большинство существующих конечных устройств основаны на жестких механических конструкциях, которые не подходят для тонких и неоднородных механических свойств чайных побегов, что указывает на необходимость в биомиметрических, совместимых конструкциях с интегрированными датчиками усилия. Будущие исследования должны быть сосредоточены на интеграции на системном уровне, объединении облегченных моделей зрения, 3D-восприятия, адаптивного планирования движения и совместимых исполнительных устройств для уборки урожая с минимальными повреждениями в сложных полевых условиях.

Ключевые слова: роботизированная система сбора урожая, обнаружение чайных побегов, манипулятор, планирование траектории, исполнительное устройство.

ANALYTICAL REVIEW OF ROBOTIC SYSTEMS FOR TEA HARVESTING

Abstract. Robotic plucking-tea systems (RPS) have been proposed as a promising solution to address labor shortages and enhance operational efficiency in high-quality tea production. However, their practical deployment is constrained by complex field conditions, including dense canopy structures, frequent occlusions, and the high visual similarity between tender shoots and mature leaves. This review systematically analyzes 58 relevant publications, organized according to the RPS operational workflow and three core technical modules: machine vision-based detection and localization, manipulator path planning, and low-damage end-effector design. Deep learning methods, particularly YOLO- and R-CNN-based architectures, have substantially improved tea shoot detection accuracy, yet robust performance under variable illumination and real-time implementation on embedded platforms remains challenging. For robotic manipulation, optimization algorithms and reinforcement learning strategies have been explored to enhance trajectory planning and obstacle avoidance; nevertheless, adaptability in dynamic and unstructured environments is still limited. In addition, most existing end-effectors rely on rigid mechanical structures that are unsuitable for the delicate and heterogeneous mechanical properties of tea shoots, indicating a need for biomimetic, compliant designs with integrated force sensing. Future research should focus on system-level integration, combining lightweight vision models, 3D perception, adaptive motion planning, and compliant end-effectors to achieve reliable and low-damage harvesting performance in complex field conditions.

Keywords: robot plucking system, tea shoots detection, manipulator, path planning, end-effector.

Introduction. Tea harvesting in China mainly relies on manual plucking and mechanical harvesting methods. Manual plucking is used for high-quality tea production, preserving shoot integrity and minimizing damage. Mechanical harvesting improves efficiency and reduces labor demand, but current machines cannot accurately identify and localize tender shoots. Most systems apply uniform cutting to the upper canopy, indiscriminately collecting young and old leaves, stems, and damaged materials, which reduces product quality and increases post-harvest sorting workload while negatively affecting shoot regeneration, and remains a key industry challenge overall [1].

To overcome these limitations, robotic plucking systems (RPS) have emerged as a promising solution, enabling selective, efficient, and low-damage harvesting. However, several challenges remain. Tea plants exhibit dense canopy structures, and the visual similarity between young and mature leaves («green-to-green») complicates accurate detection, especially under variable outdoor lighting. Additionally, tea shoots are small, variably oriented, and often occluded by surrounding foliage, resulting in missed detections and positioning errors. Finally, the fragility of tea shoots necessitates the development of gentle, biomimetic end-effectors. Addressing these challenges is essential for advancing high-precision robotic tea harvesting technologies.

Before our research, existing reviews in the tea industry focused on machine learning (ML) and DL applications for tea grading [2], quality assessment [3], and disease prediction [4]. However, there has yet to be a comprehensive review addressing the key technical challenges associated with RPS for tea harvesting. This paper makes significant contributions by focusing on several critical technologies: the identification and location of tea shoots based on machine vision, the path planning of the manipulator, the development of low-damage plucking methods for the end-effector, and the exploration of potential long-term solutions for promoting RPS.

Materials and methods.

Research methodologies. The core components of the tea robotic plucking system consist of a camera vision system, a mechanical manipulator, and an end-effector. The end-effector is installed at the end of the manipulator, as illustrated in Fig. 1. The

© Янь Я., Чичерин И. В., Чжао Л., Си Т., Ан Ч., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

plucking process begins with the camera capturing images of the tea leaves, followed by the application of recognition algorithms to recognize tender tea shoots from the aged leaf background, and obtaining the coordinates of the tender shoots. Subsequently, path optimization is performed based on the generated coordinate sequence, which is then transmitted to the motion control system of the manipulator. The motion control system directs the manipulator to follow the optimal trajectory to reach the target plucking points. Finally, the end-effector performs the point-to-point plucking operation, simulating the action of human fingers. The research problem is raised by exploring how to achieve such an automated plucking workflow.

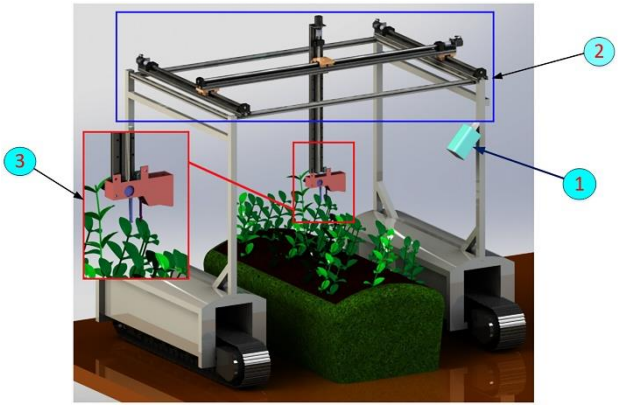


Fig. 1 – Illustration of a robotic tea plucking system. Components: 1) Camera vison system, 2) Manipulator, 3) End-effector

To identify the specific aspects of the RPS, three Research Questions (RQs) are proposed to help select the closely related papers to support the research.RQ1: How can tea shoots be identified and located in a complex tea garden environment? RQ2: How can path planning be carried out for the manipulator in a high-density tea bush? RQ3: How can tea shoots be plucked with low damage by operating the end effector?

A systematic literature search (SLR) is organized through the Web of Science and Google Scholar databases. Keywords with quotations (" ") are used to represent compound words, and Boolean operators "OR" and "AND" were applied. This retrieval strategy considered both comprehensiveness (by expanding the scope through "OR") and precision (by narrowing the scope through "AND"). To ensure that the retrieved articles are consistent with the research topic of this paper, the abstracts of all articles are read. Duplicate literature and literature with low relevance to the topic are excluded. Finally, 58 closed articles are retained for review. The literature research strategy is shown in Fig. 2.

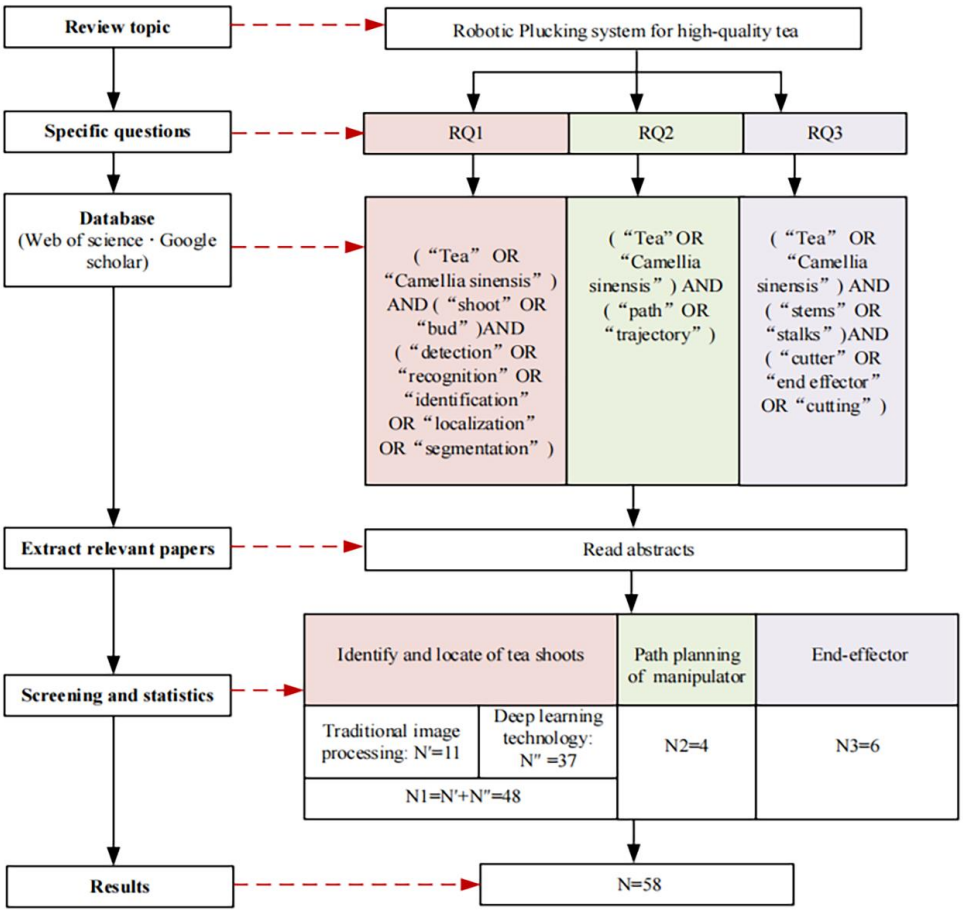


Fig. 2 – Literature research strategy

Research questions of the robotic tea plucking system. This section presents a content analysis of the selected papers, and its objective is to answer the RQ1, RQ2, and RQ3 of the SLR.

RQ1 – Detection of tea shoots. In complex tea garden environments, the accurate and rapid detection (recognition and localization) of tea shoots is one of the crucial steps towards developing RPS, and it is also the precondition for path planning to reach the target shoots. DL can simulate the human brain to interpret data and learn from the features of the images themselves. So, it can overcome the defects of insufficient robustness in field applications only based on color, shape, or texture features. DL approaches have demonstrated remarkable capabilities in performing target detection within highly unstructured agricultural fields [5]. The detection of DL tea targets mainly includes networks based on R-CNN or YOLO. To improve detection accuracy and speed, simplify the model network, and deploy it on low-computing-power platforms to meet the needs of real-time detection in the tea garden, many efforts have been reported to improve these networks. Table 2 summarizes the sensors, targets, and categories, and the performance of the DL approach. The application of different improved YOLO networks is a more popular method. It can directly generate the class probabilities and location coordinates of the tea targets.

Until now, limited studies have focused on detecting tea shoots based on the R-CNN network [6] trained a Region-based Convolutional Neural Network (Faster R-CNN) to detect regions of OBTL in images. A Fully Convolutional Network (FCN) was employed to identify the coordinates of the two-dimensional (2D) plucking points. To further enhance detection accuracy [7], utilized the Mask R-CNN model and designated the center points of the binary image of the tea stems as plucking points. [8, 9] developed an improved Mask R-CNN model, focusing on recognizing the contours of shoots and the locations of plucking points. This proposed method can accurately detect and segment tea shoot regions at the pixel level in complex scenes, providing precise 2D coordinates. Despite the high accuracy of this detection method, it is associated with computational complexity and time consumption, which limit real-time monitoring in tea plantations.

In the past five years, many scholars have focused on developing tea shoot detection models based on the YOLO series of networks. [10] employed an improved YOLOv3 model, defining the 2D plucking point as the intersection of the bounding box's bottom edge with the shoot. [11] introduced the enhanced YOLOv4 network to predict tea shoots, utilizing HSV image segmentation and convex hull detection algorithms to calculate the 2D plucking points. [12] proposed an improved YOLOv7 algorithm, it replaced the original convolutional blocks with depth-wise separable convolution blocks (DS Conv) and added a Convolutional Block Attention Module (CBAM) and a Coordinate Attention (CA) module to improve 2D coordinates accuracy. [13] utilized YOLOv5 as the foundational network, leveraging attention mechanisms to extract more detailed information about tea shoots. They introduced a Spatial Pyramid Pooling Fast (SPPF) layer in front of the head to optimize the information fusion capabilities of the attention module. They implemented a lightweight convolution method, known as Group Shuffle Conv (GSConv), to maintain model efficiency. [14] proposed a method for locating 2D plucking points that combines the YOLOv3 algorithm, semantic segmentation, skeleton extraction, and minimum enclosing rectangle techniques. This robotic computer vision system achieved an 80 % success rate in indoor settings. While the aforementioned studies successfully achieved 2D localization of plucking points when visible, it is important to note that these points are often located below the tea shoots. So, plucking points on the tea stems can be easily obscured by other tea shoots, leaves, or stalks. Furthermore, 2D images do not provide information regarding the distance between the target tea shoot and the camera, making direct localization of plucking points in the field challenging. Therefore, leveraging depth information to achieve three-dimensional (3D) localization for harvesting presents a promising solution.

Research on 3D localization technology for tea shoots is more suited to field harvesting. [15] proposed an algorithm for tea shoot detection and 3D pose estimation, achieving results within 0.2 seconds. To determine the 3D coordinates of tea shoots, [16] employed an RGB-D camera. By merging depth images captured by the RGB-D camera with RGB images, they obtained a 3D point cloud of the target detection area. Subsequently, Euclidean clustering and target point cloud extraction algorithms were used to obtain the point cloud of the tea shoots. Finally, by integrating the growth characteristics of tea plants and plucking strategies, they identified the 3D plucking locations, addressing the issue of potentially invisible plucking points in the field. To further improve the 3D location accuracy, [17] adopted an improved YOLOv5 model. In the model, an Efficient Channel Attention Network (ECANet) module and the Bidirectional Feature Pyramid Network (BiFPN) were integrated. After obtaining the 3D point cloud of the region of interest in the detection results, the 3D point cloud of tea shoots was extracted using the DBSCAN clustering algorithm to determine the 3D coordinates of the tea shoot plucking points. The positioning experiments were conducted in tea gardens, and the average absolute errors in the x, y, and z directions were 3.159 mm, 6.918 mm, and 7.185 mm, respectively. Methods for tea shoot recognition and 3D localization based on DL have demonstrated significant effectiveness. However, during the feature extraction process, the increasing depth of the network layers results in a corresponding rise in the model's parameters. This approach is not only time-consuming but also computationally expensive. Therefore, these challenges hinder the deployment of DL models on low-computational-power platforms for high-speed target detection. This limitation impacts the implementation and application of tender shoot detection models on small mobile terminals and, to some extent, constrains the development of robot plucking systems.

To facilitate the implementation of DL algorithms in practical applications, many researchers have begun exploring the deployment of DL models on low-power platforms. The focus is on compressing DL models to reduce the number of parameters, minimize model size, and enhance detection real-time performance while maintaining accuracy. [18] proposed a tea segmentation and plucking point localization method based on a lightweight convolutional neural network, MC-DM (MultiClass DeepLabV3 + MobileNetV2). This architecture employed an optimized MobileNetV2 to minimize the number of parameters. Similarly, [19] introduced a detection method for OBTL on edge devices, utilizing ShuffleNetv2-YOLOv5Lite-E architecture. This approach involved removing the Focus layer and replacing the original feature extraction network with the ShuffleNetv2 network, followed by channel pruning at the neck layer of YOLOv5 to reduce model size. The improved YOLOv5 demonstrated a detection speed that is 3.2 times faster than the original YOLOv5 model. In another study, [20] investigated a lightweight model based on an improved YOLOv4. This model, known as Ghost-Net, replaced the backbone network of YOLOv4 and employs depth-wise separable convolutions in place of standard convolutions. A Convolutional Block Attention Module (CBAM) is integrated into the Path Aggregation Network (PANet) to bolster the model's feature extraction capabilities. Compared to the original YOLOv4, this proposed algorithm reduces computational complexity by 89.11 % and the number of parameters by 82.36 %, thereby lowering the cost and complexity of deploying visual modules. Furthermore, [21] introduced a lightweight TS-YOLO model that integrates YOLOv4, MobileNetV3, deformable convolutions, and coordinated attention modules (CAM). This model is capable of efficiently and accurately detecting tea canopy bud points under both natural and artificial lighting conditions. [22] proposed a lightweight model based on the YOLOv5, where the Ghost-conv module replaces the original convolutional layers, effectively reducing computational load and model size. A Bottleneck Attention Module (BAM) is incorporated into the backbone network to suppress irrelevant information and enhance de-

tection accuracy. Moreover, [23] studied Bud Key-point Localization Network (TBKNet), which can directly locate plucking points without relying on target shape features, significantly reducing computational load. [24] proposed an improved YOLOX detection model based on the Swin Transformer, which achieved a 5.73 % increase in accuracy compared to the original YOLOX model while also realizing faster detection speeds. These studies represent advancements in the deployment of tea detection systems in complex tea garden environments.

RQ2 – Path planning of the manipulator. Furthermore, the manipulator plays a crucial role in the development of RPS, primarily tasked with trajectory tracking to accurately reach designated tea shoot positions. Among the various types of manipulators, Delta parallel robots and Cartesian coordinate robots are commonly employed for pluck-and-place operations, demonstrating significant success in tea harvesting applications. However, automatic path planning is difficult. It requires an optimal distance to minimize time to avoid collisions and ensure a smooth trajectory.

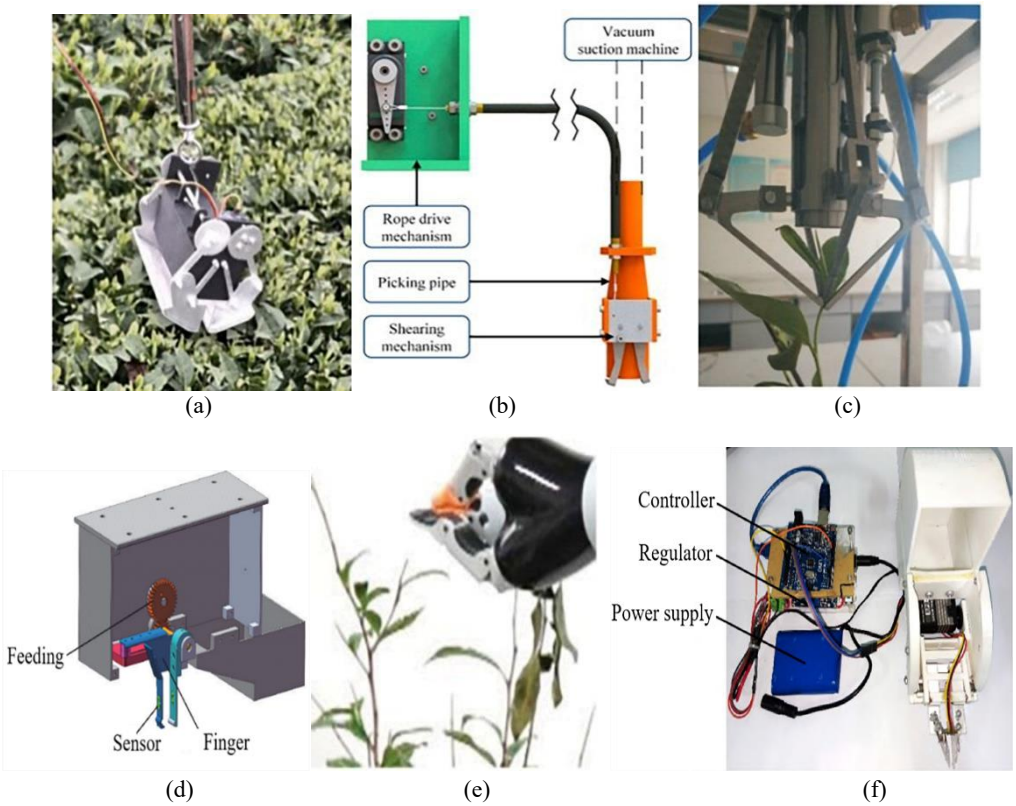
The tea shoots are densely distributed on the upper part of the tea tree canopy, and the plucking of tea shoots can be regarded as a Traveling Salesman Problem (TSP). The ant colony algorithm (ACA), with its advantages of positive feedback, robustness, and parallelism, is one of the earliest swarm intelligence algorithms proposed to solve TSPs. Despite its advantages, classical ACA often suffers from local optima, slow convergence rates, and low search efficiency. [25] proposed an Improved Ant Colony Algorithm (IACA), which enhances the efficiency of shortest path planning for tea harvesting by 5 % compared to traditional ACA and accelerates convergence speed by 60 %. [26] combined genetic algorithms (GA) to identify global optimal paths, achieving time savings of 3.7 % and 6 % when harvesting 60 and 80 tea shoots, respectively. In tea gardens, obstacles such as tree trunks, branches, and irrigation equipment require the manipulator to avoid these impediments to ensure safe harvesting.

Furthermore, the varying growth positions and heights of tea shoots require the manipulator to adjust its actions dynamically, complicating the path-planning process proposed an improved Deep Q-Network (DQN) method that dynamically adjusts the harvesting path. This approach identifies the 3D coordinates of plucking points on tea stems while considering speed, angular velocity, and distance errors. Simulations are conducted on the Gazebo platform, and results demonstrated that this method achieved a positioning accuracy of 0.005 meters and improved path optimization efficiency by 3.6 %, although field tests are still necessary to validate these results utilized the Rapidly-exploring Random Tree (RRT) algorithm. This method generates search paths starting from the manipulator of the robot and ending at target points. The iterative approach allows for path intersections while modeling the manipulator in the configuration space, considering both free space and obstacles to ensure safe navigation. Experimental results showed a planning success rate of 87 % with regular and 94 % with open irregular obstacles, providing a reliable path-planning solution to safely plucking in the RPS. Furthermore, within the operational process of the actuator, the switch between vertical and horizontal motions leads to sudden acceleration changes. This phenomenon consequently places more stringent demands on the smoothness and stability of the path planning for the manipulator. [27] put forward a velocity curve model methodology predicated on optimizing time and jerk. Specifically, the Lamé curve was employed to refine the plucking trajectory, while the particle swarm optimization (PSO) algorithm was utilized to optimize the cycle time of the plucking path. The experimental results show that this method can shorten the plucking time and perform well in jerk suppression.

RQ3 – End-effector. The end effector directly operates on the target tea shoots, detaching them from the tea stems, which has a significant impact on the quality of the harvested shoots. Consequently, the design of this component in the RPS plays a crucial role in the performance of robotic plucking. However, considerable challenges still remain in designing an effective end effector. It is influenced by the mechanical properties of the tea stems, which are dependent on their locations. Moreover, the high-density growth, small size, and fragility of tea shoots limit the available space for the manipulator. Therefore, the design of an appropriate end effector is essential for the application of harvesting.

The physical and mechanical properties of tea stems are essential for designing an end-effector suitable for high-quality tea harvesting [28]. The physical characteristics include stem diameter, moisture content, maturity, microstructure, and density [29]. The mechanical properties involve the load-displacement, loading stiffness, bending energy, force-displacement relationship during shearing, shear stress, and shear energy [30]. Most research on crop stems has focused on hollow-stemmed crops like cotton, wheat, and rice, with limited studies on tea stems. Recent studies have explored the mechanical properties of tender tea shoots, examining factors such as maximum tensile stress, fracture stress, elastic modulus, maximum force point strain, and fracture strain across different cultivars and leaf positions [31, 32]. This research highlights the relationship between these mechanical properties and coarse fiber content, enhancing our understanding of how tea shoot characteristics affect plucking processing. Other studies have measured the mechanical properties of tea stems at various locations using bending and shearing tests [33]. They defined parameters like loading stiffness, unloading stiffness, and plastic deformation ease, along with bending energy, to assess the difficulty of bending and deformation. To create a morphology model for tea shoots, researchers [34] identified key growth parameters, including bud length, stem length, bud angle, stem angle, and growth time. They also defined harvesting indicators such as the total vertical length of the bud and stem, harvesting radius, and vertical stem length. Using artificial neural networks (ANN), they established relationships between growth parameters and harvesting indicators, showing strong predictive capabilities for tea harvesting metrics. Based on the above research, various types of end-effectors have been proposed designed an end-effector that can clamp and lift tea shoots (Fig. 3(a)). The operational completion rate for the OBOL design was 91 %, while the OBTL design achieved a 94 % completion rate. To enhance the plucking rate, [35] proposed a multi-point plucking scheme. This design treated the end of the picker as a fixed-size plucking box and defined its coverage area. By using the Graham algorithm, they optimized the coverage of the boxes to focus on the plucking points. Accurately determining the spatial positions of tea shoots using machine vision technology was challenging due to their varying orientations. It is thus difficult to locate the plucking point with only the aid of machine vision. To solve this, [36] developed a picker that uses negative pressure guidance (Fig. 3(b)). This picker directs airflow to guide the tender shoots from top to bottom, correcting their posture. The deformation was studied using the immersed boundary lattice Boltzmann method, which helped compensate for positioning errors and facilitated the clamping and shearing of the shoots. To tackle plucking side shoots, the team designed a split-blade end-effector. This design used the curved deformation of the split-blade teeth to navigate around the tea stems, allowing for effective harvesting of side shoots. developed a bionic claw-type end-effector (Fig. 3(c)), which is powered by pneumatic force. This device pulled the stems of new shoots to break them, achieving a success rate of nearly 70 %. Inspired by hand plucking, [37] designed a lifting-type handheld mechanical arm (Fig. 3(d)). This arm used a servo motor to rotate active fingers in conjunction with passive fingers to clip the tender shoots, achieving a success rate of 74.3 % and an average speed of 25.2 shoots per minute. [38] created a bionic three-fingered picker that works with a robotic arm, using motion control algorithms to mimic human picking actions (Fig. 3(e)). However, this design faced a challenge with insufficient precision in controlling the gripping force, causing some tea shoots to fall off during plucking. [39]designed a flexible pinching and cutting picker (Fig. 3(f)). This device used a cam

mechanism to first close the blades for pinching and then release the tea leaves for collection. It featured a flexible sponge block at the contact point to minimize damage to the tender tea buds. However, this design did not incorporate tea shoot detection and positioning to conduct field tests, which lacked actual plucking test data.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Fig. 3 – Different types of end-effectors: (a)[40], (b) [42], (c) [44], (d) [45], (e) [46], (f) [47]

Results and discussion. This section is organized into three subsections, where we discuss the key conclusions drawn from RQ1, RQ2, and RQ3, and identify the focal points for future research that will contribute to the development of RPS.

RQ1. Traditional target recognition technologies struggle in field environments, leading to low efficiency in detecting tea shoots. Despite advances in DL techniques that have enhanced robotic tea-plucking systems in these unstructured conditions, many uncontrollable factors remain unaddressed. For instance, variations in the morphology and color of tea shoots can arise from differences in geographical location, cultivation methods, lighting conditions, and seasonal changes, necessitating considerable efforts to establish a comprehensive database. Currently, DL models are limited to recognizing only up to five tea categories [40], highlighting their restricted generalization capabilities across diverse tea varieties. Furthermore, the stability of visual recognition systems is paramount for the accurate localization of tea shoots. While vision-based 3D reconstruction techniques hold promise, existing technologies encounter challenges, such as low fill rates of RGB-D visual sensors when capturing tea shoots. Although DL methods for object detection have demonstrated effectiveness, the complexity of deeper neural networks results in an increased number of model parameters, rendering them time-consuming and computationally intensive. RPS imposes high demands on target detection models, necessitating rapid detection for real-time processing and compact model sizes suitable for embedding in devices. Consequently, there is an urgent need to develop lightweight object detection models tailored for edge devices. Enhancing the performance of visual recognition systems on platforms such as Raspberry Pi and Jetson Nano represents a critical area for future research.

RQ2. The task of the harvesting manipulator is to reach the target tea shoot location positions based on a sequence of coordinates derived from trajectory planning. In the path planning for tea harvesting, the IACA is combined with a GA, leveraging the global search capabilities of the GA and the local optimization capabilities of the IACA. This hybrid approach allows for better adaptation to the distribution of tea shoots and enables the identification of the optimal path in the shortest possible time. Utilizing DL algorithms, such as the improved YOLO series, enables precise identification and localization of tea shoots, providing accurate target points for path planning. Through training on a substantial dataset of tea shoot samples, the model can quickly recognize tea shoots in various growth states. During the tea harvesting process, a depth camera constructs a three-dimensional spatial model of the tea shoots to determine their coordinates. By integrating the RRT algorithm with DQN, the manipulator can accurately compute its movement trajectory and harvesting actions. For instance, when harvesting tea shoots from different positions, the manipulator can precisely adjust its posture and location to avoid colliding with the tea plants. The reinforced DL algorithm utilizes the coordinates of the tea shoots, along with factors such as speed, angular velocity, and distance error, as guiding elements for the reward function. Through reinforcement learning training, optimal actions can be selected based on real-time environmental conditions, thereby optimizing the harvesting path. In complex tea garden environments, the manipulator can dynamically adjust its harvesting path in response to changes in tea growth, enhancing its perceptual capabilities regarding the target tea shoots. This dynamic adaptability represents a key area for future research.

RQ3. The mechanical properties of the tea stems can vary greatly depending on their location, and it is essential to consider the agronomic standards for plucking high-quality tea. Existing end-effectors usually employ rigid mechanical structures for the gripping mechanism, utilizing a shearing method rather than a gentle plucking approach. This can lead to the rupture of tea leaf cell tissues, resulting in the formation of black substances from the reaction between tea polyphenols and oxygen, which diminishes the

fresh green appearance and authentic flavor of the tea. Furthermore, the lack of effective, flexible protective materials at the contact points with the tea shoots can cause surface abrasions and stem breakage, adversely affecting their economic value. According to agronomic standards, simulating manual harvesting actions is more aligned with the variable postures of tea shoots. However, controlling the gripping force of the fingers is challenging; excessive gripping force may damage the surface or internal tissues of the tea shoots, while insufficient force could result in the shoots falling off. This method also tends to be slower, making it difficult to meet the demands of large-scale harvesting. Moreover, existing end-effectors often lack error compensation capabilities when visual localization is disrupted by factors such as lighting and wind. It is therefore very crucial to simulate hand-plucking actions to ensure the integrity and quality of the tea leaves when designing the end-effector. This should be combined with sensor technologies to adaptively control the appropriate gripping force, develop a gentle harvesting method, and endow the end-effector with error compensation capabilities. These aspects represent key areas for future research and development.

Conclusions. The RPS offers a promising long-term solution for tea harvesting. This paper systematically outlines the robotic tea-plucking workflow and focuses on three key research challenges: tea shoot recognition and localization, path planning, and low-damage end-effector design. A comprehensive literature review is conducted to synthesize recent advances in these areas. The results indicate that deep learning-based detection models should further improve generalization ability and explore lightweight architectures for real-time deployment. In addition, the integration of 3D reconstruction technologies is essential for more accurate spatial localization of tea shoots under complex canopy conditions. For motion planning, manipulators should dynamically adapt harvesting trajectories to plant growth variability by leveraging advanced path planning strategies and reinforcement learning methods. Moreover, inspired by the gentle grasping behavior of human fingers and the biomechanical properties of tea stems, novel compliant end-effectors should be developed to minimize damage during harvesting. In conclusion, this review aims to provide insights for researchers in deep learning and agricultural robotics, facilitating new ideas and promoting the development of efficient, intelligent, and low-damage robotic tea harvesting systems.

Acknowledgments. This work is supported by the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (Grant No. KJQN202401341, KJQN202101330) and the Technology Innovation and Application Development Project of Chongqing Yongchuan District Science and Technology Bureau (Grant No. 2024yc-cxfz30079).

References

1. J. Zhang, Z. Li, X. Liu. Intelligent Tea-Picking System Based on Active Computer Vision and Internet of Things. Security and Communication Networks, 2021. P. 1–8.

2. Gill G.S., Kumar A., Agarwal R. Monitoring and grading of tea by computer vision – A review. Journal of Food Engineering, 2011. 106(1). P. 13–19.

3. Bhargava A., et al. A review on tea quality and safety using emerging parameters. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022. P. 1–21.

4. Yashodha G., Shalini D. An integrated approach for predicting and broadcasting tea leaf disease at early stage using IoT with machine learning – a review. Materials Today: Proceedings, 2021. 37. P. 484–488.

5. Hua X., et al. A Review of Target Recognition Technology for Fruit Picking Robots: From Digital Image Processing to Deep Learning. Applied Sciences, 2023. 13(7).

6. Chen Y.-T., Chen S.-F. Localizing plucking points of tea leaves using deep convolutional neural networks. Computers and Electronics in Agriculture, 2020. 171.

7. Wang T., et al. Tea picking point detection and location based on Mask-RCNN. Information Processing in Agriculture, 2023. 10(2). P. 267–275.

8. Lu J., et al. A Machine Vision-Based Method for Tea Buds Segmentation and Picking Point Location Used on a Cloud Platform. Agronomy, 2023. 13(6).

9. Cheng Y., et al. Locating Tea Bud Keypoints by Keypoint Detection Method Based on Convolutional Neural Network. Sustainability, 2023. 15(8).

10. Yang H., et al. Tender Tea Shoots Recognition and Positioning for Picking Robot Using Improved YOLO-V3 Model. IEEE Access, 2019. Vol. 7. P. 180998–181011.

11. Gong T., Wang Z. A tea tip detection method suitable for tea pickers based on YOLOv4 network, in 2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT). 2021. P. 264–268.

12. Meng J., et al. Tea Buds Detection in Complex Background Based on Improved YOLOv7. IEEE Access, 2023. 11. P. 88295–88304.

13. Wang M., et al. Small target tea bud detection based on improved YOLOv5 in complex background. Front Plant Sci, 2024. 15. P. 1393138.

14. Chen C., et al. A YOLOv3-based computer vision system for identification of tea buds and the picking point. Computers and Electronics in Agriculture, 2022. 198.

15. Chen Z., et al. Tea Bud Detection and 3D Pose Estimation in the Field with a Depth Camera Based on Improved YOLOv5 and the Optimal Pose-Vertices Search Method. Agriculture, 2023. 13(7).

16. Li Y., et al. In-field tea shoot detection and 3D localization using an RGB-D camera. Computers and Electronics in Agriculture, 2021. Vol. 185.

17. Zhu L., et al. Detection and Localization of Tea Bud Based on Improved YOLOv5s and 3D Point Cloud Processing. Agronomy, 2023. 13(9).

18. Yan C., et al. Tea Sprout Picking Point Identification Based on Improved DeepLabV3+. Agriculture, 2022. 12(10). 1594.

19. Zhang S., et al. Edge Device Detection of Tea Leaves with One Bud and Two Leaves Based on ShuffleNetv2-YOLOv5-Lite-E. Agronomy, 2023. 13(2). 577.

20. Li J., et al. Lightweight detection networks for tea bud on complex agricultural environment via improved YOLO v4. Computers and Electronics in Agriculture, 2023. 211.

21. Zhang Z., et al. TS-YOLO: An All-Day and Lightweight Tea Canopy Shoots Detection Model. Agronomy, 2023. 13(5).

22. Gui Z., et al. A lightweight tea bud detection model based on Yolov5. Computers and Electronics in Agriculture, 2023. 205.

23. Chen S., et al. Improved keypoint localization network for tea bud based on YOLO framework. Computers and Electrical Engineering, 2024. 119.

24. Li X., et al. An improved model based on YOLOX for detection of tea sprouts in natural environment. Evolving Systems, 2024.

25. Wu M., et al. Research on path planning of tea picking robot based on ant colony algorithm. Measurement and Control, 2024. 57(8). P. 1051–1067.

26. Zheng Y., et al. 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. 2024. P. 497–509.

27. Yang H., et al. Hybrid Strategy of Parallel Tea Picking Robot Trajectory Planning Based on Optimal Time and Jerk. Journal of Mechanical Engineering, 2022. 58(9).

28. Liu QingTing, L.Q., et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks. 2007.

29. Wu W., Hu Y. Mechanical properties of tea stalks for cutting, in 2019 Boston, Massachusetts July 7–July 10, 2019. 2019.

30. YanPing, L., et al. Experiment on mechanical properties and crude fiber of tea leaf. Journal of Tea Science, 2013. 33(4). P. 364–369.

31. Du Zhe D.Z., YongGuang H.Y. Hu, Buttar N. Analysis of mechanical properties for tea stem using grey relational analysis coupled with multiple linear regression. 2019.

32. Du, Z., et al. Structural analysis on cutting notch of tea stalk by X-ray micro-computed tomography. Information Processing in Agriculture, 2020. 7(2). P. 242–248.

33. Salvatian S.B., SOHEILI F.F., MAJD S.K. Effect of mechanical plucking height on tea green leaf yield and its quality. 2014.

34. Wang, X., et al. Fundamental Understanding of Tea Growth and Modeling of Precise Tea Shoot Picking Based on 3-D Coordinate Instrument. Processes, 2021. 9(6).

35. Xu L., et al. Design of an efficient combined multipoint picking scheme for tea buds. Front Plant Sci, 2022. 13. P. 1042035.

36. Zhu Y., et al. Deviation Tolerance Performance Evaluation and Experiment of Picking End Effector for Famous Tea. Agri-culture, 2021. 11(2).

37. Jiangming J., et al. Design and Experimental Optimization of Hand-held Manipulator for Picking Famous Tea Shoot. Nongye Jixie Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2022. 53(5).

38. Motokura K., et al. Plucking Motions for Tea Harvesting Robots Using Probabilistic Movement Primitives. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020. 5(2). P. 3275–3282.

39. Luo K., et al. Design and Experiment of the Combined Pinch and Cut Picker for Tea Fresh Leaf Tips. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng, 2022. 38. P. 1–9.

40. Wu Y., et al. 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, 2024. 41(4). P. 1167–1186.

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 331.108:658.3

Т.И. Наседкина, А.И. Черных, И.А. Демешева

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Аннотация. Эффективное использование трудовых ресурсов в сельскохозяйственных организациях является одной из ключевых основ повышения конкурентоспособности отрасли, сохранения продовольственной безопасности, развития сельских территорий. В отрасли наблюдается нехватка работников в период сезонных полевых работ, в животноводстве, при работе с техникой. Потребность в труде резко возрастает в периоды посевной, ухода за культурами, уборки, а в межсезонье падает. Это ведёт к неравномерной загрузке и текучести кадров. Для сельского хозяйства характерны старение кадров, недостаточный приток молодёжи, низкий уровень оплаты труда по сравнению со средними показателями по экономике, что стимулирует отток работников в другие сферы, структурные перекосы – нехватка специалистов определённых профилей.

В целом оценка эффективности использования персонала является важным инструментом управления ресурсами, который помогает организациям повышать свою конкурентоспособность и достигать поставленных целей. В настоящее время нет единой точки зрения в проведении оценки эффективности использования трудовых ресурсов. Различные методики анализа использования трудовых ресурсов изложены в работах, посвященных комплексному экономическому анализу финансово-хозяйственной деятельности организаций.

В статье изложены теоретические аспекты, касающиеся понятия «трудовые ресурсы», методов анализа использования трудовых ресурсов. Проведен краткий обзор рынка труда Белгородской области. Представлен анализ эффективности использования трудовых ресурсов одного из крупных агрохолдингов региона, ООО «Русагро-Инвест», с помощью стандартных приемов и методов экономического анализа, обозначены направления роста производительности и оплаты труда работников предприятия.

Ключевые слова: трудовые ресурсы, экономический анализ, эффективность труда, производительность труда, текучесть кадров, мотивация.

IMPROVING THE FORMATION OF ACCOUNTING (FINANCIAL) REPORTING AND WAYS TO INCREASE FINANCIAL RESULTS

Abstract. The effective use of labor resources in agricultural organizations is one of the key foundations for increasing the competitiveness of the sector, maintaining food security, and developing rural areas. The sector experiences a shortage of workers during the seasonal field work period, in livestock farming, and when operating machinery. The need for labor increases sharply during sowing, crop care, and harvesting periods, and decreases during the off-season. This leads to uneven workload and staff turnover. Agriculture is characterized by an aging workforce, insufficient influx of young people, and low wages compared to the average indicators for the economy, which encourages workers to leave for other sectors, as well as structural imbalances – a shortage of specialists in certain fields.

Overall, assessing the efficiency of personnel use is an important resource management tool that helps organizations improve their competitiveness and achieve their goals. Currently, there is no single point of view on how to assess the efficiency of using labor resources. Various methods for analyzing the use of labor resources are presented in works devoted to comprehensive economic analysis of the financial and economic activities of organizations.

The article presents theoretical aspects related to the concept of «labor resources» and methods for analyzing the use of labor resources. A brief overview of the labor market in the Belgorod region is provided. An analysis of the efficiency of using labor resources at one of the region's major agro-holdings, LLC «Rusagro-Invest», is presented using standard techniques and methods of economic analysis; the areas for increasing the productivity and wages of the company's employees are identified.

Keywords: labor resources, economic analysis, labor efficiency, labor productivity, staff turnover, motivation.

Решение проблемы обеспечения населения продовольствием в определяющей степени зависит от эффективности использования трудовых ресурсов в сельском хозяйстве региона. Важным фактором и основополагающим элементом, от которого зависят конечные результаты производства, выступает труд [3, 5].

Трудовые ресурсы оказывают значительное влияние на результаты деятельности сельскохозяйственного предприятия. Они являются ключевым фактором производства, от качества и эффективности использования которого зависят объём производства, качество продукции, экономическая эффективность, конкурентоспособность предприятия и его способность к дальнейшему развитию. Недостаточная обеспеченность может привести к невыполнению запланированного объёма работ, несоблюдению оптимальных агротехнических сроков их проведения и сокращению объёма производства [4, 7].

Эффективно использовать сложные технологии может только человек, обладающий специальными знаниями и навыками. Уровень квалификации напрямую влияет на качество выполнения работ и конечные результаты производства. Трудовые ресурсы являются решающим фактором в организации сельскохозяйственного производства, который влияет на его эффективность, конкурентоспособность и устойчивость развития.

Принимая во внимание систему классификации состава населения, предлагаемую Международной Организацией

© Наседкина Т. И., Черных А. И., Демешева И. А., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Труда (МОТ), трудовые ресурсы можно разбить на две группы: экономически активное население и экономически неактивное население, рис. 1.

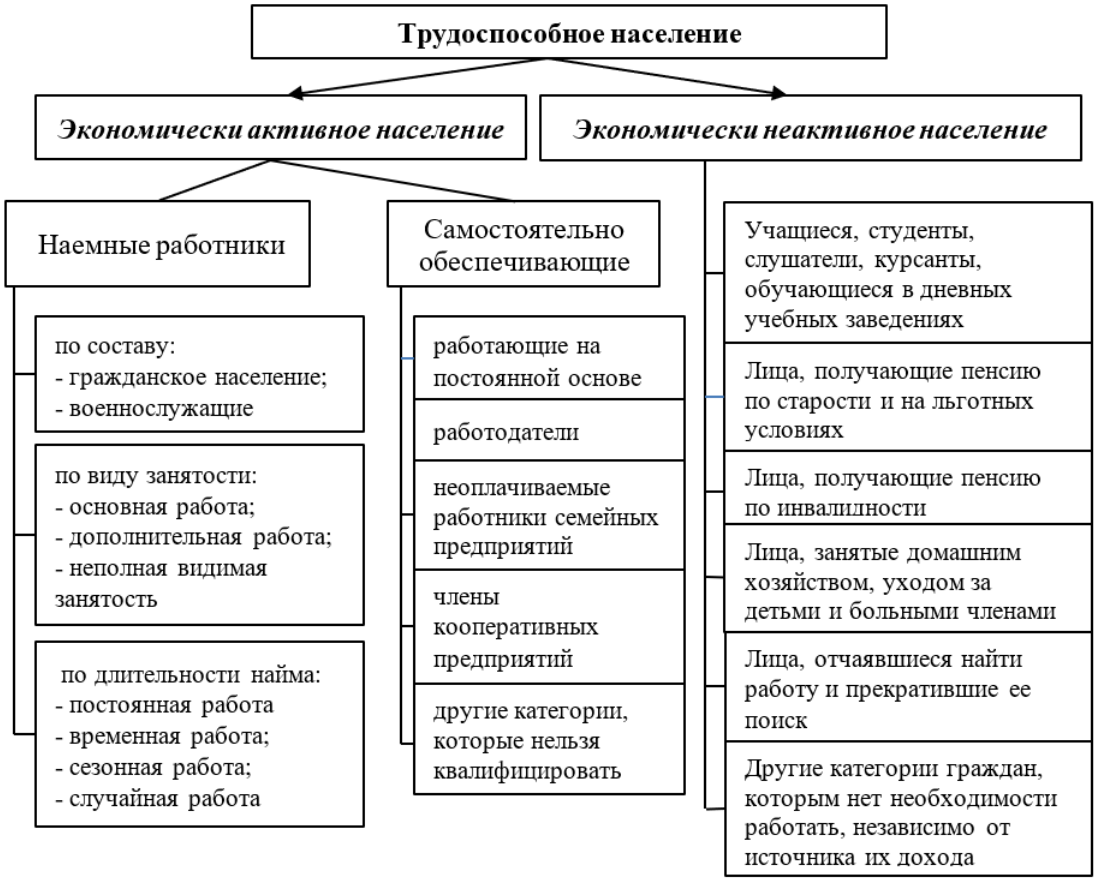


Рис. 1 – Состав трудовых ресурсов в сельском хозяйстве

Понятие «трудовой потенциал» следует рассматривать с двух позиций – как статистический показатель и как экономическую категорию. Как статистический показатель трудовой потенциал – это значение численности трудовых ресурсов в рассматриваемом периоде, которое может быть достигнуто вовлечением при определенных условиях в экономическую деятельность пока незанятых в экономике трудовых ресурсов; это трудовой потенциал территории, региона, страны.

«Согласно правоприменительной практике и нормативным актам, трудоспособное население – это лица в возрасте от 16 лет и до достижения возраста, дающего право на страховую пенсию по старости в соответствии с частью 1 статьи 8 Федерального закона «О страховых пенсиях» (за исключением неработающих инвалидов этого возраста). Верхняя граница трудоспособного возраста ежегодно определяется с учётом положений, предусмотренных приложением 6 к Закону №400-ФЗ. С 2019 года в России началась пенсионная реформа, которая предусматривает постепенное повышение пенсионного возраста. К 2028 году он достигнет 65 лет для мужчин и 60 лет для женщин. Таким образом, в 2026 году верхняя граница трудоспособного возраста зависит от года рождения человека и этапа переходного периода реформы [1].

При проведении учета и оценки численности трудовых коллективов и использовании рабочей силы руководствуются следующими основными понятиями в соответствии с Общероссийским классификатором профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов (ОКПДТР).

Работники – это общее понятие лиц, выполняющих работу, т.е. работающих на предприятии, в организации, учреждении. Рабочие – это работники сферы материального производства, занимающиеся физическим трудом при выполнении технологических операций. Служащие – это работники умственного труда, занятые на предприятиях в различных учреждениях, конторах, осуществляющие деятельность, связанную с управлением, подготовкой и обработкой различных документов.

К руководителям относятся работники предприятий, их структурных подразделений и их заместители по должностям: директора, начальники, управляющие, менеджеры, главные специалисты (главный бухгалтер, главный агроном, главный инженер и т.д.). Специалисты – работники, занятые инженерно-техническими, экономическими, учетными работами, в частности, инженеры, нормировщики, экономисты, бухгалтера, юрисконсульты и т.д. Другие служащие – это работники, осуществляющие подготовку и оформление документации, первичный учет и контроль, хозяйственное обслуживание: делопроизводители, табельщики, учетчики, кассиры, водители легкового транспорта и т.д.

В сельском хозяйстве все основные технологические процессы в основном выполняются собственными трудовыми ресурсами, лишь в исключительных случаях в периоды наиболее напряженных работ привлекаются сезонные и временные работники из других отраслей.

Специфика использования трудовых ресурсов в сельском хозяйстве и перерабатывающих отраслях заключается в сезонности труда, являющейся результатом несовпадения периодов производства и рабочего периода. Сезонность выражается в увеличении потребности в труде в период посевных работ, ухода за растениями, уборки урожая, переработки сельскохозяйственного сырья и уменьшении ее в зимний период [8].

Таким образом, к трудовым ресурсам относится та часть населения, которая обладает необходимыми физическими данными, знаниями и навыками труда в соответствующей отрасли. Достаточная обеспеченность предприятий нужными трудовыми ресурсами, их рациональное использование, высокий уровень производительности труда имеют большое значение для увеличения объемов продукции и повышения эффективности производства.

Эффективность использования трудовых ресурсов – важнейшее экономическое понятие, которое позволяет оценить результативность работы сотрудников, выявить их сильные и слабые стороны, определить потребности в обучении и развитии, а также принять меры по мотивации и улучшению производительности. Оценка эффективности персонала может проводиться различными способами, включая оценку результатов работы, оценку компетенций и навыков, а также оценку потенциала для развития.

Оценка эффективности использования трудовых ресурсов позволяет предприятиям:

1. Проводить оценку производительности труда, позволяющую определить, насколько эффективно персонал выполняет свои обязанности и достигает поставленных целей.

2. Выявлять сильные и слабые стороны: определение успешных практик и процессов, а также идентификация проблемных областей, требующих улучшений.

3. Принимать меры по улучшению: разработка планов по улучшению процессов, обучение сотрудников, внедрение новых технологий и т. д.

4. Оптимизировать расходы: рациональное использование персонала позволяет сократить издержки за счет оптимизации рабочих процессов и распределения ресурсов.

5. Принимать стратегические решения: результаты оценки помогают руководству принимать обоснованные стратегические решения, связанные с наймом, увольнением, обучением и мотивацией персонала.

6. Улучшать коммуникацию и сотрудничество: оценка эффективности также способствует улучшению коммуникации внутри организации и сотрудничеству между различными подразделениями и сотрудниками.

В целом, оценка эффективности использования персонала является важным инструментом управления ресурсами, который помогает организациям повышать свою конкурентоспособность и достигать поставленных целей.

Алгоритм исследования эффективности использования трудовых ресурсов и производительности труда основан на ряде методов, рис. 2.



Рис. 2 – Методы исследования эффективности использования трудовых ресурсов

Для оценки эффективности использования трудовых ресурсов применяется ряд показателей, которые могут быть сгруппированы по трем направлениям:

- показатели, характеризующие обеспеченность предприятия трудовыми ресурсами;
- показатели, характеризующие движение трудовых ресурсов на предприятии;
- показатели, характеризующие эффективность использования трудовых ресурсов на предприятии.

Для определения численности работников организации за какой-либо период недостаточно принимать численность работников на дату, так как в этих показателях не учитываются изменения, происшедшие в течение рассматриваемого периода. Для этого производится суммирование численности работников списочного состава за каждый календарный день отчетного месяца, т.е. с 1 по 31, включая праздничные (нерабочие) и выходные дни, и деления полученной суммы на число календарных дней отчетного месяца.

Комплексный анализ эффективности использования трудовых ресурсов позволяет не только оценить текущее состояние трудовых ресурсов, но и сформировать стратегию их эффективного использования для роста производительности труда и конкурентоспособности предприятия.

Рынок труда в Белгородской области последние годы продолжает претерпевать значительные изменения под влиянием глобальных и локальных факторов. Технологический прогресс, экономическая ситуация, демографические сдвиги и изменения в законодательстве – все это оказывает влияние на работодателей и соискателей. Несмотря на цифровизацию и

автоматизацию, проблема нехватки квалифицированных специалистов остается актуальной. Предприятия вынуждены повышать зарплаты, предлагать расширенные социальные пакеты и вкладываться в обучение сотрудников.

В 2025 году трудовые ресурсы Белгородской области составили 895,1 тыс. человек, или 59,6 % общей численности населения Наибольшую часть 91,1 % составляет население в трудоспособном возрасте, 8 % – лица старше трудоспособного возраста и подростки, занятые в экономике и 1 % – иностранные трудовые мигранты. За последние 5 лет трудовые ресурсы снизились на 2 %. Это произошло за счет снижения населения в трудоспособном возрасте на 0,4 % и лиц старше трудоспособного возраста и подростков, занятые в экономике на 20 % [2].

Численность населения, не занятого в экономике региона, составила в 2025 году 57 тыс. человек, а его доля в численности трудовых ресурсов – 5,4 %. В 2021 году доля данной категории населения в численности трудовых ресурсов составляла 10,6 %.

Трудовые ресурсы распределяются на среднегодовую численность занятых в экономике, на учащихся в трудоспособном возрасте, обучающихся с отрывом от работы и на трудоспособное население в трудоспособном возрасте. По данным баланса среднегодовая численность занятых в экономике в 2025 году достигла 765,3 тыс. человек. Доля среднегодовой численности занятых в экономике в численности трудовых ресурсов составила 85,5 %.

По данным обследования в Белгородской области за 2025 год численность рабочей силы (экономически активного населения) составила 815,7 тыс. человек, или 63,8 % от обследуемого населения области, в их числе 791,9 тыс. человек, или 97,1 % рабочей силы были заняты в экономике и 23,8 тыс. человек (2,9 %) не имели занятия, но активно его искали. В соответствии с методологией МОТ они классифицируются как безработные. В составе рабочей силы в 2025 году 90,7 % составляли лица в трудоспособном возрасте (мужчины в возрасте 16–62 лет, женщины в возрасте 16–57 лет).

Показатели безработицы занимают важное место в статистике рынка труда. По данным Министерства социальной защиты населения и труда Белгородской области по состоянию на конец декабря 2025 года в центрах занятости населения области состояло на учете 2203 человек, не занятых трудовой деятельностью. Официальный статус безработного имели 1998 человека, что на 370 человек меньше, чем на конец декабря 2023 года. Уровень регистрируемой безработицы на 1 января 2026 года составил 0,25 %, что ниже уровня аналогичного периода на 0,04 процентных пункта. Уровень общей безработицы в 2025 году составил 2,9 %, что на 0,7 п.п меньше, чем в 2024 году.

Сельское хозяйство имеет ряд специфических проблем и задач в области формирования и использования трудовых ресурсов. Потребность в рабочих кадрах сельского хозяйства определяется потребностями каждого его предприятия и отрасли, а предложение – размерами территории и структурой населения. Обеспечение хозяйства рабочей силой – важнейшее условие его успешной реализации.

Дефицит квалифицированных сотрудников влечет недостаток компетенций в узких направлениях, что ухудшает качество управления предприятием при отсутствии возможности корректного анализа производственной ситуации. Это неизбежно снижает экономическую эффективность и повышает риски.

По состоянию на 2025 год в сфере трудовых ресурсов сельского хозяйства Белгородской сохраняется острый дефицит кадров. В 2025 году дефицит кадров в агропромышленном комплексе (АПК) региона оценивался в 1700 человек. Белгородская область вошла в топ-10 по числу вакансий в АПК. Наиболее востребованы агрономы, ветеринары, инженеры, механизаторы и разнорабочие.

Технологический прогресс в АПК увеличивает потребность в работниках, которые умеют работать с базами данных, платформами, системами ИИ и роботизированными комплексами. Это связано с внедрением точного земледелия и цифровизации производственных процессов. Часть вакансий в аграрном секторе закрывается благодаря студентам, которые приходят на практику и решают остаться на предприятии после получения образования. Ключевым поставщиком специалистов для региона остаётся Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина.

В регионе реализуются меры поддержки, включая субсидии на развитие производства, льготное кредитование, гранты для фермеров и семейных хозяйств. Также предусмотрены субсидии на строительство (приобретение) жилья гражданам, проживающим на сельских территориях [10].

Ситуация в сфере трудовых ресурсов сельского хозяйства Белгородской области характеризуется сочетанием кадрового дефицита и роста требований к квалификации работников. Для решения проблем требуются дальнейшие меры по развитию образования, улучшению условий труда и жизни на селе, а также поддержке молодых специалистов. Повышение доходов населения и появление новых рабочих мест в легальном секторе увеличивают налоговые поступления в региональный бюджет [6].

Трудовые ресурсы – один из ключевых факторов производства, поскольку от их состояния, качества, количества и эффективности использования напрямую зависят результаты хозяйственной деятельности предприятия, его конкурентоспособность и эффективность производства в целом. Анализируя обеспеченность трудовыми ресурсами ООО «РусагроИнвест» г. Белгород, следует отметить, что численность работников предприятия в 2025 году составила 1973 чел., при плане 1982 чел., следовательно, предприятие обеспечено трудовыми ресурсами на 99,5 %. Персонал предприятия составляют в большей степени мужчины – 77,2 %.

Анализ эффективности использования трудовых ресурсов показал, что в 2025 году одним работником было отработано 237 дней или 1896 часов. Средняя продолжительность рабочего дня составила 8 часов. Фонд рабочего времени в 2025 году равен 3740,3 тыс. чел.-час., что ниже уровня плана на 49,3 тыс. чел.-час., это обусловлено снижением численности среднегодовых работников на 17,2 тыс. чел.-час. и сокращением количества отработанных дней одним работником на 32,1 тыс. чел.-час.

По сравнению с базисным 2023 годом также прослеживается снижение фонда рабочего времени на 149 тыс. чел.-час, за счет уменьшения количества отработанных дней одним работником на 153 тыс. чел.-час., при этом увеличение численности работников способствовало увеличению фонда рабочего времени на 4 тыс. чел.-час.

С ростом производительности труда создаются реальные предпосылки для повышения уровня его оплаты. Фонд оплаты труда в 2025 году составил 2481817 тыс. руб., что на 764243,1 тыс. руб. больше уровня 2023 г. Наибольший удельный вес в структуре фонда занимает оплата по тарифным ставкам, окладам и сдельным расценкам 39,99 % или 992585 тыс. руб. На выплату премий за счет всех источников, включая вознаграждения по итогам работы за год израсходовано 435184 тыс. руб. или 17,53 %, на выплату отпусков 179679 тыс. руб. или 7,24 % от общей суммы начислений [9].

Фонд оплаты труда в 2025 году выше уровня 2023 года на 87291,8 тыс. руб. Данное изменение обусловлено снижением численности работников, что способствовало уменьшению фонда оплаты труда на 10021,8 тыс. руб., при этом про-

слеживается рост среднегодовой заработной платы, что увеличивает фонд оплаты труда на 97313,6 тыс. руб. В отчетном году по сравнению с базисным, рост оплаты труда прослеживается по всем категориям работников.

Одним из ключевых факторов, обеспечивающих эффективное функционирование АПК в условиях рыночной экономики, является повышение производительности труда. В сельскохозяйственном производстве рост производительности труда может быть достигнут путем увеличения количества используемых ресурсов или же путем оптимизации их использования. В процессе анализа следует установить соответствие между темпами роста средней заработной платы (ЗП) и производительностью труда (ГВ):

При этом рассчитывают коэффициент опережения ($К_{ОП}$):

$$К_{ОП} = I_{ГВ} / I_{ЗП},$$

где: $I_{ГВ}$ – индекс производительности труда,

$I_{ЗП}$ – индекс средней заработной платы.

Экономию (перерасход) определим по следующей формуле:

$$\pm Э = ФЗП_1 * ((I_{ЗП} – I_{ГВ}) / I_{ЗП}),$$

где: $ФЗП_1$ – фонд оплаты труда за отчетный период.

Проанализировав соотношение темпов роста производительности труда и темпов роста его оплаты в ООО «Русагро-Инвест» (таблица 1), следует отметить, что в отчетном периоде индекс средней заработной платы по сравнению с предыдущим годом составил 1,10, индекс производительности труда составляет 1,04. В результате этого коэффициент опережения производительности труда над его оплатой равен 0,94, что свидетельствует о снижении темпов роста производительности труда над темпом роста оплаты. И как следствие такой тенденции, перерасход средств на оплату труда в 2025 г. составил 135371,8 тыс. руб.

Таблица 1 – Соотношение темпов роста производительности труда и темпов роста его оплаты

Показатели	2023 г.	2024 г.	2025 г.
Произведено валовой продукции на 1 работника, тыс. руб.	6410,1	6945,4	7222,3
Индекс производительности труда (цепной) ($I_{ГВ}$)	-	1,08	1,04
Среднегодовая заработная плата работника, тыс. руб.	871,4	1127,9	1257,9
Индекс средней заработной платы (цепной) ($I_{ЗП}$)	-	1,30	1,10
Коэффициент опережения ($I_{ГВ} / I_{ЗП}$)	-	0,83	0,94
Фонд оплаты труда работников, тыс. руб.	1717574	2233246,9	2481816,7
Перерасход (+), экономия (-) по фонду оплаты труда, тыс. руб.	-	377934,1	135371,8

Однако на предприятии имеются неиспользованные резервы повышения уровня производительности труда.

Социально-экономическое значение роста производительности труда заключается в том, что это: единственный источник увеличения производства сельскохозяйственной продукции (в условиях постоянного сокращения численности работников сельского хозяйства); основа стабилизации и последующего снижения себестоимости продукции, работ и услуг; основа и условие повышения заработной платы работников; основа конкурентоспособности продукции, которую производитель предлагает на рынок; источник свободного времени как главного богатства и условия для физического и умственного развития человека.

Использование трудовых ресурсов в сельскохозяйственном производстве имеет ряд специфических особенностей как в отрасли растениеводства, так и в животноводческой сфере, поэтому надо учитывать влияние многочисленных экономических факторов и разнообразных природных явлений.

Следовательно, при оценке состояния производительности труда в организации и тенденций изменения его эффективности, а также определении направления развития и совершенствования трудовых ресурсов предприятия необходимо учитывать эти специфические особенности и факторы.

Можно выделить основные факторы, способствующие росту производительности труда: природно-климатические условия; трудоемкость; внедрение инновационных технологий; интенсификация производства и улучшение материально-технической базы; комплексная механизация и автоматизация производственных процессов; повышение квалификации персонала; грамотное распределение и максимально эффективное использование земли; совершенствование организации и материального стимулирования труда.

Факторы воздействуют на производительность труда в сельском хозяйстве неодинаково. Одни способствуют снижению затрат на рабочую силу, другие приводят к увеличению производства сельскохозяйственной продукции, третьи влияют как на экономию труда, так и на рост производства.

Исходя из задачи роста производительности труда, важное значение имеют изыскание и использование всех имеющихся резервов. Под резервами следует понимать имеющиеся, но еще не использованные возможности повышения производительности труда за счет наилучшего использования всех факторов ее роста.

Исходя из качественного содержания внутрипроизводственных резервов, их можно разделить на резервы снижения трудоемкости производства продукции и резервы лучшего использования фонда рабочего времени (рост производительной силы труда и рост интенсивности труда). Снижение трудоемкости производства продукции является важнейшим и неисчерпаемым резервом повышения производительности труда, связанным с комплексной механизацией и автоматизацией производства, внедрением новой и модернизацией действующей техники, совершенствованием технологических процессов, совершенствованием организации производства, внедрением научной организации труда.

Выявление резервов повышения эффективности использования рабочего времени на предприятиях предполагает поиск мероприятия и их обоснование для сокращения потерь времени работы.

В ООО «Русагро-Инвест» за счет сокращения целодневных потерь рабочего времени появляется возможность получения дополнительного выхода продукции. Расчет резервов роста производительности труда по данным 2025 года показывает, что при уменьшении целодневных потерь рабочего времени на 25,7 чел.-час. компания сможет дополнительно полу-

чить в расчете на одного работника, занятого в сельском хозяйстве, 128,1 тыс. рублей валовой продукции (таблица 2). Такой рост производства позволит повысить уровень производительности труда на 1,7 %.

Таблица 2 – Резервы роста производительности труда

Показатели	2025 год	
	план	факт
Стоимость валовой продукции (по себестоимости), тыс. руб.	14568493	14249572
Среднегодовая численность работников, занятых в сельхозпроизводстве, чел.	1982	1973
Количество рабочих дней в году на работника	239	237
Средняя продолжительность рабочего дня, ч.	8,0	8,0
Производство валовой продукции:		
на работника, тыс. руб.	7350,4	7222,3
на 1 чел./день, руб.	30683,2	30480,4
на 1 чел./час, руб.	3835,4	3809,7
Резерв увеличения полезного времени за счет ликвидации целодневных потерь рабочего времени, чел./час	-	25,7
Резерв роста производительности труда на работника: тыс. руб.	-	128,1
%	-	1,7

Для оценки эффективности использования трудовых ресурсов на предприятии важное значение имеет показатель рентабельности персонала. Поскольку прибыль зависит от рентабельности продаж (Прп/В = Роб), доли выручки в стоимости выпущенной продукции (В/ВП = УР), среднегодовой выработки продукции одним работником в действующих ценах (ВП/ЧР = ГВ), то факторная модель показателя будет иметь вид:

$$Прп/ЧР = ВП/ЧР \times В/ВП \times Прп/В = ГВ \times УР \times Роб.$$

Убыток на одного работника, занятого в сельскохозяйственном производстве ООО «Русагро-Инвест», в отчетном году составил 404,0 тыс. руб., что ниже уровня плана 1062,6 тыс. руб. (таблица 3). Анализ факторов рентабельности персонала свидетельствует, что снижение прибыли на одного работника сельскохозяйственного производства за счет снижения уровня рентабельности продаж, составило 479,9 тыс. руб. Увеличение доли реализованной продукции в валовом объеме её производства на 0,01 п.п. повлияло на показатель рентабельности персонала положительно, под влиянием данного фактора показатель увеличился на 560,5 тыс. руб., что и привело в целом к росту прибыли в расчете на среднегодового работника предприятия, а за счет снижения производительности труда показатель сократился на 1143,2 тыс. руб.

Таблица 3 – Повышение рентабельности персонала за счет изменения прибыли в 2025 году

Показатели	План	Факт	Отклонение (+;-)
Стоимость валовой продукции (по себестоимости), тыс. руб. (ВП)	14568493	14249572	-318921
Выручка от продаж, тыс. руб. (В)	16812054	16502926	-309128
Среднегодовая численность работников, занятых в сельхозпроизводстве, чел. (ЧР)	1982	1973	-9
Среднегодовая выработка продукции одним работником, занятым в сельскохозяйственном производстве, тыс. руб. (ГВ)	7350,4	7222,3	-128,1
Доля выручки в стоимости произведенной продукции (УР)	1,15	1,16	0,01
Прибыль (убыток) от реализации продукции, тыс. руб. (Прп)	1305412	-797198	-2102610
Рентабельность (убыточность) продаж, % (Роб)	7,76	-4,8	-12,56
Прибыль (убыток) на одного работника, занятого в сельскохозяйственном производстве, тыс. руб. (Прп/ЧР)	658,6	-404,0	-1062,6
Отклонение прибыли в расчете на одного работника, за счет изменения:			
-производительности труда	ΔГВ×УРпл×Робпл		-1143,2
-удельного веса реализованной продукции в общем ее выпуске	ГВф×ΔУР×Робпл		560,5
-рентабельность продаж	ГВф×УРф×ΔРоб		-479,9

В условиях современной аграрной экономики для того, чтобы находить новые рынки сбыта сельскохозяйственной продукции, внедрять новые стандарты качества, обновлять профессиональные знания, нужно постоянно повышать квалификацию с целью эффективного применения инноваций.

Сельскохозяйственным организациям сейчас нужны специалисты, способные освоить новые технологии и дорогостоящее оборудование, требующее грамотной эксплуатации. В данном случае предпочтение отдается молодым специалистам, способным быстро адаптироваться к изменениям условий производства, отношениям рыночной экономики и новым системам работы.

Основным фактором повышения эффективности использования трудовых ресурсов в сельском хозяйстве является мотивация к труду, которая выражается в урожайности сельскохозяйственных культур, что оказывает влияние на валовой сбор, а затем и на доходы предприятия.

Важный фактор, определяющий эффективность использования трудовых ресурсов, – мотивация к высокопроизводительному труду. Мотивация труда представляет собой стимулирование работника или группы работников к деятельности по достижению высоких результатов через удовлетворение их потребностей. Главные рычаги мотивации – стимулы и мотивы.

Под стимулом подразумевается материальная награда, например, заработная плата. Мотив – это внутренняя побудительная сила: желание, ориентация, внутренняя установка и др.

На рисунке 3 представлены основные пути улучшения использования трудовых ресурсов.

Наиболее эффективный стимулирующий фактор – удовлетворенность работника материальными условиями (заработной платой, премиями, доплатами за стаж работы, пособиями, продажей продукции со скидкой и др.).

Организация оплаты труда в сельскохозяйственном производстве отличается от других сфер деятельности и представляет собой такую совокупность мероприятий, которая обеспечивает обоснованное вознаграждение каждой категории работников в зависимости от количества и качества вложенного ими труда и соответствующую материальную заинтересованность.

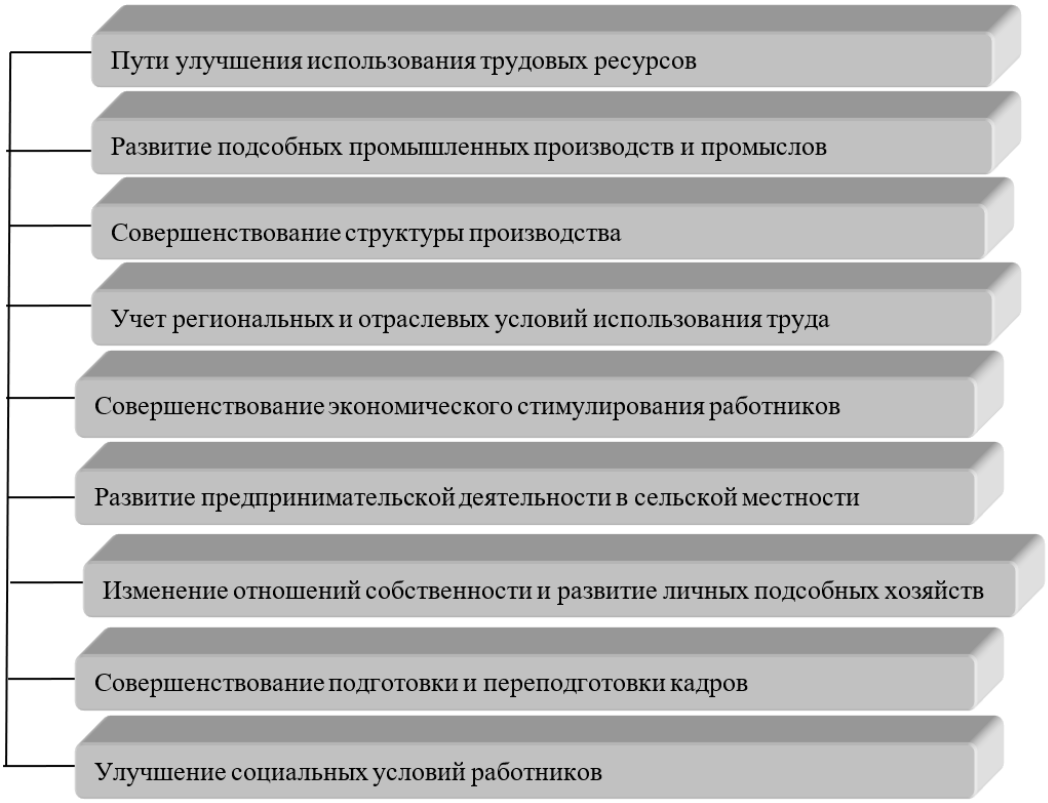


Рис. 3 – Пути улучшения использования трудовых ресурсов

Для расширенного воспроизводства, получения необходимой прибыли и рентабельности необходимо, чтобы темпы роста производительности труда опережали темп роста его оплаты. Если этот принцип не соблюдается, то происходит перерасход фонда зарплаты, повышение себестоимости продукции и, соответственно, уменьшение суммы прибыли.

Коэффициент опережения производительности труда над его оплатой равен 0,94, что свидетельствует о снижении темпов роста производительности труда над темпом роста оплаты. Поэтому необходимо провести комплекс мероприятий по совершенствованию системы материального стимулирования, которая оказывает непосредственное влияние на производительность труда.

Выявлено, что премиальная часть по результатам работы указана в трудовом договоре, но критерии для премирования не прописаны, поэтому все сотрудники получают ее по умолчанию. Предлагаем ввести анализ ключевых показателей производительности (KPI), сделать премиальные выплаты зависимыми от показателей и таким образом мотивировать сотрудников лучше работать.

Для этого необходимо разработать четкие критерии и систему оценки, на основе которых будут определяться премиальные выплаты. Важно, чтобы критерии были объективными, измеримыми и достижимыми для сотрудников. Также следует обеспечить прозрачность и справедливость процесса оценки, чтобы сотрудники понимали, какие действия и достижения приведут к получению премии.

Разработка системы ключевых показателей, необходимых для оценки эффективности работы трудовой деятельности сотрудников, должна основываться на глубоком изучении должностных инструкций каждого работника. С точки зрения экономической эффективности, главным показателем, определяющим переменную часть заработной платы работника, может являться выполнение или перевыполнение плана, а также рост производительности труда.

Предлагаются следующие возможные критерии оценки трудовой деятельности работников:

1. Урожайность – количество собранного урожая, полученное с единицы посевной площади.

2. Коэффициент использования удобрений – показатель используется в сельском хозяйстве для оценки эффективности использования удобрений.

3. Уровень заболеваемости и поражённых участков вредителям.

4. Соотношение затрат на семена к общей стоимости производства.

5. Снижение потерь урожая – разница между ожидаемым урожаем и фактическим собранным урожаем.

Внедрение такой материальной системы стимулирования в компании позволит не только повысить мотивацию и эффективность сотрудников, но и создать более конкурентоспособную и результативную рабочую среду.

Рекомендуем ежегодно увеличивать фонд оплаты труда не менее чем на уровень инфляции, а также увеличивать надтарифную часть фонда. Проект состава и структуры фонда оплаты труда представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Проект состава и структуры фонда оплаты труда в ООО «Русагро-Инвест»

Виды выплат	2025 г.		проект		Отклонение проекта от 2025 г.(+;-)	
	тыс. руб.	структура, %	тыс. руб.	структура, %	тыс. руб.	п.п.
Фонд оплаты труда – всего, в т. ч.:	2481816,7	100	2729998,4	100	248181,7	10,0
- оплата по окладам, тарифным ставкам, сдельным расценкам, отпусков	992585,4	39,99	1229591,3	45,04	237005,9	5,05
- премии	435184,3	17,53	819272,5	30,01	384088,2	12,48
- отпуск	179679,3	7,24	246245,9	9,02	66566,6	1,78
- оплата питания	50264,8	2,03	69888,0	2,56	19623.2	0,53
- районные коэффициенты и процентные надбавки (за выслугу лет, стаж работы)	156961,8	6,32	227681,9	8,34	70720,1	2,02
- прочее	667141,1	26,88	137318,9	5,03	-529822,2	-21,85

В связи с чем предлагаем сократить оплату по виду – прочее на 21,85 %, а увеличить по тарифным ставкам, окладам, сдельным расценкам – на 5,05 %, премии – на 12,48 %, отпусков – на 1,78 %, оплату стоимости питания на 0,53 % и надбавку за стаж работы, выслугу лет – 2,02 %. Это позволит более разумно подойти к материальному стимулированию каждого работника.

Повышение производительности труда во многом зависит от уровня квалификации работников. На предприятиях разрабатываются свои системы критериев и показателей для оценки труда различных категорий сотрудников.

Реализация предложенных мероприятий по повышению эффективности использования трудовых ресурсов обеспечит рост объёмов производства и производительности труда, а также будет способствовать формированию позитивного отношения работников к предприятию и улучшению социально-психологического климата в коллективе.

Библиография

1. Российская Федерация. Законы. О страховых пенсиях от 28.12.2013 г. № 400 - ФЗ (ред. от 28.11.2025 г.). https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=503779 &ysclid =mowm2abo6x67225541 (дата обращения: 11.03.2026) Текст: электронный.

2. Белгородская область в цифрах. 2026: Краткий статистический сборник / Белгородстат. 2026. 220 с.

3. Голованева Е.А. Производительность труда важнейший индикатор эффективности деятельности сельхозорганизаций / Е. А. Голованева, Ж. А. Божченко // Устойчивое и инновационное развитие в цифровую эпоху : Материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 мая 2019 года. Том Часть 2. Москва : ООО «Сам полиграфист», 2019. С. 105–109.

4. Горматин В.И. Научная оценка использования трудовых ресурсов / В. И. Горматин, Е. В. Тетюркина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 2(10). С. 53–58.

5. Демешева И.А. Анализ и направления повышения эффективности производства продукции растениеводства / И. А. Демешева, А. И. Черных // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 3(47). С. 65–71.

6. Демешева И.А. Оценка налоговой нагрузки сельскохозяйственных организаций региона / И. А. Демешева, Е. В. Тетюркина. Белгород : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ имени В.Я. Горина, 2017. 92 с.

7. Наседкина Т.И. Повышение конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции / Т. И. Наседкина, А. И. Черных, О. В. Гончаренко. Белгород : Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2022. 104 с.

8. Наседкина Т.И. Управление затратами на оплату труда / Т. И. Наседкина, А. И. Черных, И. А. Демешева. Белгород : Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 2023. 146 с.

9. Нестеров Ю.Г. Оплата труда как основной источник доходов работников: вопросы организации и совершенствования / Ю. Г. Нестеров, Л. А. Решетняк // Современные проблемы АПК и их решение : материалы VI Национальной конференции, Белгород, 13 октября 2023 года. Том 1. Белгород : Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. С. 234–237.

10. Черных А.И. Распределение сельскохозяйственных организаций региона по критериям субъектов предпринимательства и результатам рейтинговой оценки / А. И. Черных, О. В. Гончаренко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 4(20). С. 104–115.

References

1. The Russian Federation. Laws. On Insurance Pensions, dated December 28, 2013, No. 400-FZ (as amended on November 28, 2025). https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=503779&ysclid=mowm2abo6x67225541 (accessed: March 11, 2026). Text: electronic.

2. Belgorod Region in Numbers. 2026: A Brief Statistical Collection / Belgorodstat. 2026. 220 p.

3. Golovaneva E.A. Labor Productivity as the Most Important Indicator of the Efficiency of Agricultural Organizations / E. A. Golovaneva, Zh. A. Bozhchenko // Sustainable and Innovative Development in the Digital Age: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 22–23, 2019. Volume Part 2. Moscow : LLC «Sam Poligrafist», 2019. Pp. 105–109.

4. Gormatin V.I. Scientific assessment of the use of labor resources / V. I. Gormatin, E. V. Tetyurkina // Innovations in the agro-industrial complex: problems and prospects. 2016. № 2(10). Pp. 53–58.

5. Demesheva I.A. Analysis and Directions for Improving the Efficiency of Crop Production / I. A. Demesheva, A. I. Chernykh // Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects. 2025. № 3(47). Pp. 65–71.

6. Demesheva I.A. Assessment of the Tax Burden of Agricultural Organizations in the Region / I. A. Demesheva, E. V. Tetyurkina. Belgorod : Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, 2017. 92 p.

7. Nasedkina T.I. Improving the competitiveness of agricultural products / T. I. Nasedkina, A. I. Chernykh, O. V. Goncharenko. Belgorod : Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, 2022. 104 p.

8. Nasedkina T.I. Management of labor costs / T. I. Nasedkina, A. I. Chernykh, I. A. Demesheva. Belgorod : Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, 2023. 146 p.

9. Nesterov Yu.G. Remuneration as the main source of employees' income: issues of organization and improvement / Yu. G. Nesterov, L. A. Reshetnyak // Modern problems of the agro-industrial complex and their solutions: materials of the VI National Conference, Belgorod, October 13, 2023. Volume 1. Belgorod : Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, 2023. Pp. 234–237.

10. Chernykh A.I. Distribution of agricultural organizations in the region according to the criteria of business entities and the results of rating assessment / A. I. Chernykh, O. V. Goncharenko // Innovations in the agro-industrial complex: problems and prospects. 2018. № 4(20). Pp. 104–115.

Сведения об авторах

Наседкина Татьяна Ивановна, д.э.н., доцент экономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, т. +79056715937;

Черных Антонина Ивановна, к.э.н., доцент экономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503, тел. +79040878030;

Демешева Ирина Алексеевна, к.э.н., доцент экономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская область, Россия, 308503.

Information about authors

Nasedkina Tatiana Ivanovna, doctor of economics, 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, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, phone number +79056715937;

Chernykh Antonina Ivanovna, 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, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503, phone number +79040878030;

Demesheva Irina 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, Belgorod m.d., Belgorod Region, Russia, 308503.

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 также 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 – ВИНиТИ 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 транслитеррации, 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,
Муравьёв 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 681.518.5

Е.П. Тимашов, Ю.А. Власов

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ ШАРНИРА ЦЕПНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ЕЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

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)

ANALYTICAL MODEL OF TEMPERATURE IN THE FRICTION ZONE OF A CHAIN TRANSMISSION JOINT FOR ITS AUTOMATIC DIAGNOSTICS

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 – Исходные данные к расчету

Библиография

1. Анализ состояния работоспособности элементов технических систем / Т. А. Сторожук, Н. Ю. Братков // Приднепровский научный вестник. 2025. Т. 2, № 2. С. 145–149.
2. .....
3. .....

References

1. Analiz sostoyaniya rabotosposobnosti elementov tekhnicheskikh sistem [Analysis of the state of operability of elements of technical systems] / T. A. Storozhuk, N. Yu. Bratkov // Pridneprovskiy nauchnyy vestnik. 2025. Vol. 2, № 2. 145–149.
2. .....
3. .....

Сведения об авторах

Тимашов Евгений Петрович, доктор 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 39-12-33, e-mail: timachov@mail.ru;

Власов Юрий Алексеевич, аспирант инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский м.о., Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +7 4722 39-12-33, e-mail: yurij_vlasov_75@mail.ru.

Information about authors

Timashov Evgeny Petrovich, doctor 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», str. Vavilova,1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, telephone +7 4722 39-12-33, e-mail: timachov@mail.ru;

Vlasov Yuri Alekseevich, postgraduate student 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 region, Russia, telephone +7 4722 39-12-33, e-mail: yurij_vlasov_75@mail.ru.

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 logicality, 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 ex-ception 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 681.518.5

E.P. Timashov, Yu.A. Vlasov

ANALYTICAL MODEL OF TEMPERATURE IN THE FRICTION ZONE OF A CHAIN TRANSMISSION JOINT FOR ITS AUTOMATIC DIAGNOSTICS

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 – Input data for the calculation

References

1. Analiz sostoyaniya rabotosposobnosti elementov tekhnicheskikh sistem [Analysis of the state of operability of elements of technical systems] / T. A. Storozhuk, N. Yu. Bratkov // Pridneprovskiy nauchnyy vestnik. 2025. Vol. 2, № 2. 145–149.
2. .....
3. .....

Information about authors

Timashov Evgeny Petrovich, doctor 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», str. Vavilova,1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, telephone +7 4722 39-12-33, e-mail: timachov@mail.ru;

Vlasov Yuri Alekseevich, postgraduate student 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 region, Russia, telephone +7 4722 39-12-33, e-mail: yurij_vlasov_75@mail.ru.