

ТОМ 1, №1, 2026

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Продовольственная безопасность и биоэкономика

Экология / Почвоведение / Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства / Пищевые системы / Рыбное хозяйство, аквакультура и промышленное рыболовство / Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса / Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ / Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса



www.food-donstu.ru



Продовольственная безопасность и биоэкономика

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2026 года)

Том 1, № 1, 2026

Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в сферу АПК по следующим научным специальностям:

1.5.15. Экология;

1.5.19. Почвоведение;

4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства;

4.2.6. Рыбное хозяйство, аквакультура и промышленное рыболовство;

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса;

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса;

4.3.3. Пищевые системы;

4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ.

Регистрация

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 91511 от 28 апреля 2026 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Периодичность

4 выпуска в год

Адрес учредителя и издателя

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

E-mail

food@donstu.ru

Телефон

+7 (863) 238-13-60

Сайт

www.food-donstu.ru

Дата выхода в свет

30.09.2026





Food Security and Bioeconomy

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2026)

Vol. 1, no. 1, 2026

A peer-reviewed scientific and practical journal designed to inform the readers about the latest advancements, trends and prospects in the field of construction, architecture, urban planning and adjacent scientific fields. The journal serves a platform for scientific and educational cooperation of researchers and scholars engaged in the agro-industrial sector, covering the following research specializations:

- Ecology;
- Soil Science;
- Animal Science, Feed and Feed Technology, and Livestock Production;
- Fisheries, Aquaculture and Commercial Fishing;
- Technologies, Machinery and Equipment for the Agro-Industrial Complex;
- Electrical Technologies, Electrical Equipment and Energy Supply for the Agro-Industrial Complex;
- Food Systems;
- Biotechnology of Food Products and Biologically Active Substances.

<i>Registration</i>	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 91511 dated April 28, 2026, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
<i>Founder and Publisher</i>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
<i>Periodicity</i>	4 issues per year
<i>Address of the Founder and Publisher</i>	1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
<i>E-mail</i>	food@donstu.ru
<i>Telephone</i>	+7 (863) 238-13-60
<i>Website</i>	www.food-donstu.ru
<i>Date of Publication</i>	30.09.2026



Редакционная коллегия

Главный редактор

Месхи Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, академик РАО, ректор Донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

Матишов Геннадий Григорьевич, доктор географических наук, профессор, академик РАН, заместитель Президента РАН, научный руководитель ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рудой Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, декан факультета «Агропромышленный» Донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

Ольшевская Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, заместитель декана факультета «Агропромышленный» Донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственный секретарь

Теплякова Светлана Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и технический сервис транспортно-технологических систем» Донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Абонеев Василий Васильевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, член-корреспондент РАН, член-корреспондент РАСХН, Краснодарский научный центр по зоотехнии и ветеринарии (Краснодар, Российская Федерация)

Алексеев Елена Викторовна, доктор технических наук, профессор, Российский биотехнологический университет (Москва, Российская Федерация)

Андреев Василий Леонидович, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Андреев Сергей Андреевич, доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева (Москва, Российская Федерация)

Бахарева Анна Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Москва, Российская Федерация)

Безуглова Ольга Степановна, доктор биологических наук, профессор, Академия биологии и медицины им. Щ. И. Ивановского Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Беляев Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Воронеж, Российская Федерация)

Брагинцев Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, АНЦ «Донской», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Брагина Татьяна Михайловна, доктор биологических наук, профессор, Азово-Черноморский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтурсынулы (Костанай, Казахстан)

Виноградов Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева (Москва, Российская Федерация)

Воробьева Светлана Леонидовна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Удмуртский государственный аграрный университет (Ижевск, Российская Федерация)

Волхонов Михаил Станиславович, доктор технических наук, профессор, ректор, Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Кострома, Российская Федерация)

Гаглоев Александр Черменович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Мичуринский государственный аграрный университет (Мичуринск, Российская Федерация)

Головин Александр Витальевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста (Подольск, Российская Федерация)

Горбов Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Российская Федерация)

Донцова Александра Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Аграрный научный центр «Донской», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Донченко Людмила Владимировна, доктор технических наук, профессор, НИИ Биотехнологии и сертификации пищевой продукции Кубанского государственного аграрного университета (Краснодар, Российская Федерация)

Евдокимов Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Епимахова Елена Эдугартовна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Заделенов Владимир Анатольевич, доктор биологических наук, профессор, Красноярский филиал Всероссийского НИИ рыбного хозяйства и океанографии (Красноярск, Российская Федерация)

Каниева Нурия Абдрахимовна, доктор биологических наук, профессор, Астраханский государственный технический университет (Астрахань, Российская Федерация)

Камбулов Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, АНЦ «Донской», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Каргин Виталий Александрович, доктор технических наук, профессор, Российский биотехнологический университет (Москва, Российская Федерация)

Колесников Сергей Ильич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Корниенко Владимир Олегович, кандидат биологических наук, доцент, Донецкий государственный университет (Донецк, Российская Федерация)

Лачуга Юрий Фёдорович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, академик РАСХН (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Максимова Светлана Николаевна, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный рыбохозяйственный технический университет (Владивосток, Российская Федерация)

Марко Петкович, PhD, доцент кафедры пищевых технологий факультета агрономии, Крагуевацкий университет (Чачак, Сербия)

Марченко Дмитрий Михайлович, кандидат сельскохозяйственных наук, АНЦ «Донской» (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Минкина Татьяна Михайловна, доктор биологических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Наумова Наталья Леонидовна, доктор технических наук, доцент, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Южно-Уральский государственный университет (НИУ) (Челябинск, Российская Федерация)

Неманья Милетеч, PhD, доцент кафедры пищевых технологий факультета агрономии, Крагуевацкий университет (Чачак, Сербия)

Никитенко Геннадий Владимирович, доктор технических наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Оськин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Российская Федерация)

Пахомов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор АНЦ «Донской», Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Потороко Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (НИУ) (Челябинск, Российская Федерация)

Svetoslav Dimitrov Todorov, профессор кафедры пищевых наук и экспериментального питания факультета фармацевтических наук Университета Сан-Паулу (Сан-Паулу, Бразилия)

Seyed Hossein Hoseinifar, Ph.D в области аквакультуры, профессор Горганского университета сельскохозяйственных наук и природных ресурсов (Иран), адъюнкт-профессор Чиангмайского университета (Таиланд)

Фролова Нина Анатольевна, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (Калининград, Российская Федерация)

Храмова Елена Петровна, доктор биологических наук, Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Российская Федерация)

Юдаев Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Российская Федерация)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Besarion Ch. Meskhi, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Education, Rector of Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Deputy Editors-in-Chief

Gennady G. Matishov, Dr. Sci. (Geographical), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy President of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Dmitry V. Rudoy, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Dean of the Faculty of Agribusiness, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Editor

Anastasiya V. Olshevskaya, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Dean of the Faculty of Agribusiness, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretary

Svetlana V. Teplyakova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Design and Technical Service of Transport and Technological Systems, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vasily V. Aboneev, Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Krasnodar Research Center for Animal Science and Veterinary Medicine (Krasnodar, Russian Federation)

Elena V. Alexeyenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Russian Biotechnological University (Moscow, Russian Federation)

Vasily L. Andreev, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Sergey A. Andreev, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)

Anna A. Bakhareva, Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (Moscow, Russian Federation)

Olga S. Bezuglova, Dr. Sci. (Biological), Professor, Academy of Biology and Medicine named after Shch.I. Ivanovsky, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Alexander N. Belyaev, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (Voronezh, Russian Federation)

Sergey V. Braginets, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Agrarian Research Center "Donskoy"; Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Tatyana M. Bragina, Dr. Sci. (Biological), Professor, Azov-Black Sea Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), State Scientific Center of the Russian Federation; Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly (Kostanay, Kazakhstan)

Alexander V. Vinogradov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)

Svetlana L. Vorobyeva, Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Udmurt State Agrarian University (Izhevsk, Russian Federation)

Mikhail S. Volkhonov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector, Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma, Russian Federation)

Alexander Ch. Gagloev, Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Michurinsk State Agrarian University (Michurinsk, Russian Federation)

Alexander V. Golovin, Dr. Sci. (Biological), Professor, Federal Research Center for Animal Husbandry — L.K. Ernst Institute of Animal Husbandry (Podolsk, Russian Federation)

Sergey N. Gorbov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Natalia I. Davydenko, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation)

Alexandra A. Dontsova, Cand. Sci. (Agricultural), Associate Professor, Agrarian Research Center "Donskoy"; Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Lyudmila V. Donchenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Research Institute of Biotechnology and Certification of Food Products, Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russian Federation)

Ivan A. Evdokimov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, North Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Elena E. Epimakhova, Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Stavropol State Agrarian University (Stavropol, Russian Federation)

Vladimir A. Zadelenov, Dr. Sci. (Biological), Professor, Krasnoyarsk Branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (Krasnoyarsk, Russian Federation)

Nuriya A. Kanieva, Dr. Sci. (Biological), Professor, Astrakhan State Technical University (Astrakhan, Russian Federation)

Sergey I. Kambulov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Agrarian Research Center "Donskoy"; Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vitaly A. Kargin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Russian Biotechnological University (Moscow, Russian Federation)

Sergey I. Kolesnikov, Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vladimir O. Kornienko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation)

Yury F. Lachuga, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the RAS, Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Svetlana N. Maksimova, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Far Eastern Fishery Technical University (Vladivostok, Russian Federation)

Marko Petković, PhD, Associate Professor, Department of Food Technology, Faculty of Agronomy, University of Kragujevac (Čačak, Serbia)

Dmitry M. Marchenko, Cand. Sci. (Agricultural), Agrarian Research Center "Donskoy"; Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Tatyana M. Minkina, Dr. Sci. (Biological), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Natalya L. Naumova, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Ural Federal Agrarian Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; South Ural State University, National Research University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Nemanja Miletić, PhD, Associate Professor, Department of Food Technology, Faculty of Agronomy, University of Kragujevac (Čačak, Serbia)

Gennady V. Nikitenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Stavropol State Agrarian University (Stavropol, Russian Federation)

Sergey V. Oskin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russian Federation)

Viktor I. Pakhomov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Agrarian Research Center "Donskoy"; Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Irina Y. Potoroko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, South Ural State University, National Research University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Svetoslav Dimitrov Todorov, Professor, Department of Food Science and Experimental Nutrition, Faculty of Pharmaceutical Sciences, University of São Paulo (Brazil)

Seyed Hossein Hoseinifar, PhD in Aquaculture, Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (Iran); Adjunct Professor, Chiang Mai University (Thailand)

Nina A. Frolova, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Kaliningrad State Technical University (Kaliningrad, Russian Federation)

Elena P. Khramova, Dr. Sci. (Biological), Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation)

Igor V. Yudaev, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russian Federation)

СОДЕРЖАНИЕ

БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

- Широкова Н.В., Федоров В.Х.* Влияние полиморфизма гена MSTN на качество мяса овец породы советский меринос 9

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

- Дейнека И.Г., Шаповалова А.С.* Подходы к формированию системы управления профессиональными рисками на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК 15

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

- Сальник Н.В., Горбов С.Н., Бузин Д.И., Лобзенко И.П.* Валовой химический состав антропогенно-преобразованных почв Федеральной территории «Сириус» 25

- Токарева Ф.Ю., Горовцов А.В.* Изменение культивируемости почвенных бактерий при внесении ростовых факторов 33

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

- Удалов А.А.* Экономическая эффективность выращивания аквакультур в установках замкнутого водоснабжения с использованием кормов на основе личинки чёрной львинки 42

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

- Тимошенко М.К., Нгуен Суан Тьем.* Экспериментальное исследование параметров тонкослойной дегидратации яблочных чипсов 49

ЧАСТНАЯ ЗООТЕХНИЯ, КОРМЛЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОРМОВ И ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА

- Максак Д.А.* Исследование рабочего процесса технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева 58

ЭКОЛОГИЯ

- Реуцкая В.В., Шкиренко А.О., Антропова Л.П., Джантимирова А.А., Корниенко В.О.* Лесные городские экосистемы Донбасса в условиях изменяющегося климата 73

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

- Савенков Д.Н., Щербаков А.А., Мироненко А.А., Кобыляцкий П.С.* Энерготехнологический критерий для управления резервом охлаждения молока при нарушении электроснабжения 83

CONTENTS

BIOTECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS AND BIOACTIVE SUBSTANCES

- Shirokova NV, Fedorov VKh.** Influence of MSTN Gene Polymorphism on Meat Quality in Soviet Merino Sheep 9

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

- Deyneka IG, Shapovalova AS.** Approaches to the Formation of an Occupational Risk Management System at Enterprises of Agricultural Machinery Engineering and Technical Service of the Agro-Industrial Complex . 15

SOIL SCIENCE

- Salnik NV, Gorbov SN, Buzin DI, Lobzenko IP.** Total Chemical Composition of Anthropogenically Transformed Soils of the Sirius Federal Territory 25

- Tokareva FYu, Gorovtsov AV.** Changing the Cultivability of Soil Bacteria with the Addition of Growth Factors 33

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHING

- Udalov AA.** Economic Efficiency of Aquaculture Cultivation in Recirculating Aquaculture Systems using Feeds based on Black Soldier Fly Larvae 42

FOOD SYSTEMS

- Timoshenko MK, Nguyen Xuan Thiem.** Experimental Investigation of Thin-Layer Dehydration Characteristics of Apple Chips 49

SPECIFIC ANIMAL HUSBANDRY, ANIMAL FEEDING, FEED PRODUCTION TECHNOLOGIES, AND LIVESTOCK PRODUCTION

- Maksak DA.** Investigation of the Operating Process of a Technological Module for High-Intensity Combined Thermal Treatment of Compound Feed Ingredients Using Convective and Microwave Heating 58

ECOLOGY

- Reutskaya VV, Shkirenko AO, Antropova LP, Dzhanimirova AA, Kornienko VO.** Forest Urban Ecosystems of Donbass in a Changing Climate 73

ELECTRICAL TECHNOLOGIES, ELECTRICAL EQUIPMENT AND POWER SUPPLY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

- Savenkov DN, Sherbakov AA, Mironenko AA, Kobylatsky PS.** Energy-Technological Criterion for Managing Milk Cooling Reserve During Power Supply Failures 83

БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

BIOTECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS AND BIOACTIVE SUBSTANCES



УДК 636.35/.38

Оригинальное эмпирическое исследование

Влияние полиморфизма гена MSTN на качество мяса овец породы советский меринос

Н.В. Широкова , В.Х. Федоров 

Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Ростовская область, Российская Федерация

✉ nadva.shirockowa@yandex.ru

Аннотация

Введение. Современное животноводство характеризуется активным внедрением молекулярно-генетических технологий, позволяющих повысить эффективность селекционной работы и ускорить создание высокопродуктивных стад сельскохозяйственных животных. В условиях возрастающих требований к качеству мясной продукции особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление генетических маркеров, ассоциированных с продуктивными и технологическими свойствами мяса. Особую значимость проблема приобретает в мериносовом овцеводстве, где традиционно основное внимание уделялось шерстной продуктивности, тогда как мясные качества животных требуют дальнейшего совершенствования. В связи с этим актуальным является изучение генетических факторов, влияющих на формирование потребительских свойств баранины у овец породы советский меринос. Целью исследования являлось изучение влияния полиморфизма гена MSTN на качество мяса, полученного от овец породы советский меринос.

Материалы и методы. Исследования проводили на овцах породы советский меринос, разводимых в колхозе имени «Скиба» Ростовской области. Объектом исследования являлись баранчики, выращенные в идентичных условиях кормления и содержания. Для молекулярно-генетического анализа у животных отбирали биологический материал с последующим выделением геномной ДНК стандартными методами. Полиморфизм гена MSTN определяли методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) с использованием специфических праймеров. Полученные ампликоны подвергали рестрикционному анализу методом PCR-RFLP с применением эндонуклеаз рестрикции. Разделение фрагментов ДНК проводили методом электрофореза в агарозном геле с последующей визуализацией результатов в ультрафиолетовом свете. Органолептическую оценку проводили после контрольного убоя животных. Для исследования использовали длиннейшую мышцу спины (m. longissimusdorsi).

Результаты исследования. Результаты проведенных исследований согласуются с современными представлениями о роли гена MSTN в регуляции роста мышечной ткани и формировании мясной продуктивности сельскохозяйственных животных. Установленное преимущество генотипа MSTN_{AG} по ряду органолептических показателей может быть связано с особенностями формирования структуры мышечной ткани и интенсивностью белкового обмена.

Обсуждение и заключение. Полученные данные подтверждают перспективность использования гена MSTN в качестве молекулярно-генетического маркера при селекции овец мясного и комбинированного направления продуктивности. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения результатов при разработке селекционных программ, направленных на повышение качества баранины и улучшение потребительских свойств мясной продукции.

Ключевые слова: овцы, полиморфизм, мясная продуктивность, продуктивные показатели, генетические маркеры, ген MSTN, советский меринос

Финансирование. Авторы выражают благодарность Министерству сельского хозяйства РФ за финансирование данного исследования, которое проводится в рамках тематического план-задания на 2026 год.

Для цитирования. Широкова Н.В., Федоров В.Х. Влияние полиморфизма гена MSTN на качество мяса овец породы советский меринос. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):9–14.

Influence of *MSTN* Gene Polymorphism on Meat Quality in Soviet Merino Sheep

Nadezda V. Shirokova , Vladimir Kh. Fedorov 

Don State Agrarian University, Persianovsky settlement, Rostov Region, Russian Federation

✉ nadya.shirockowa@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern animal husbandry is characterized by the active introduction of molecular genetic technologies aimed at increasing the efficiency of breeding programs and accelerating the development of highly productive livestock populations. Under the conditions of increasing requirements for meat quality, special attention is being paid to studies focused on identifying genetic markers associated with productive and technological characteristics of meat. This issue is of particular importance in Merino sheep breeding, where primary emphasis has traditionally been placed on wool productivity, while meat quality traits still require further improvement. In this regard, the study of genetic factors influencing the consumer properties of lamb meat in Soviet Merino sheep is highly relevant. The aim of the study was to investigate the influence of *MSTN* gene polymorphism on the meat quality of Soviet Merino sheep.

Materials and Methods. The studies were carried out on Soviet Merino sheep bred at the “Skiba” collective farm in the Rostov region. The objects of the study were ram lambs raised under identical feeding and management conditions. Biological samples were collected from the animals for molecular genetic analysis followed by genomic DNA extraction using standard methods. The *MSTN* gene polymorphism was determined by polymerase chain reaction (PCR) using specific primers. The obtained amplicons were subjected to restriction analysis using the PCR-RFLP method with restriction endonucleases. DNA fragments were separated by agarose gel electrophoresis followed by visualization under ultraviolet light. Organoleptic evaluation was performed following control slaughter of animals. The longissimus dorsi muscle was used for the study.

Research Results. The obtained results are consistent with current concepts regarding the role of the *MSTN* gene in the regulation of muscle tissue growth and the formation of meat production in farm animals. The identified advantage of the *MSTN*_AG genotype in several organoleptic characteristics may be associated with specific features of muscle tissue structure formation and protein metabolism intensity.

Discussion and Conclusion. The obtained data confirm the potential of using the *MSTN* gene as a molecular genetic marker in breeding programs aimed at improving meat and dual-purpose sheep production. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the results in breeding programs focused on improving lamb quality and enhancing the consumer properties of meat products.

Keywords: sheep, polymorphism, meat production, productive traits, genetic markers, *MSTN* gene, Soviet Merino

For citation. Shirokova NV, Fedorov VKh. Influence of *MSTN* Gene Polymorphism on Meat Quality in Soviet Merino Sheep. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):9–14.

Введение. Современное животноводство развивается в направлении широкого внедрения молекулярно-генетических технологий, которые позволяют существенно повысить эффективность селекционного процесса. Использование ДНК-диагностики и геномных маркеров обеспечивает возможность раннего отбора животных с высоким генетическим потенциалом, что особенно важно для отраслей, где продуктивные признаки формируются под влиянием сложного комплекса наследственных и средовых факторов.

В последние годы геномные исследования в овцеводстве активно направлены на выявление генов-кандидатов, ассоциированных с мясной продуктивностью и качеством мясного сырья. Особое внимание уделяется гену *MSTN* миостатину, который является ключевым негативным регулятором роста скелетной мышечной ткани. Современные исследования подтверждают, что изменения в структуре или экспрессии *MSTN* приводят к увеличению мышечной массы, изменению морфологии мышечных волокон и, как следствие, к вариациям в органолептических характеристиках мяса [1, 2].

Для мериносового овцеводства проблема повышения мясной продуктивности остаётся актуальной, поскольку традиционно селекция данной породы была ориентирована преимущественно на шерстную продуктивность. В современных экономических условиях возрастает необходимость формирования животных комбинированного направления продуктивности, сочетающих высокое качество шерсти и улучшенные мясные характеристики [3]. Современные генетические исследования у овец охватывают широкий спектр хозяйственно полезных признаков — от продуктивных качеств до экстерьерных особенностей [4].

Материалы и методы. Объектом исследования служили овцы породы советский меринос, разводимые в колхозе имени «Скиба» Ростовской области. Данная популяция характеризуется высокой адаптивностью к природно-климатическим условиям региона, удовлетворительными показателями шерстной продуктивности и перспективностью для совершенствования мясных качеств [5]. Особое внимание в исследовании уделялось изучению полиморфизма гена *MSTN* (миостатина), играющего ключевую роль в регуляции роста и развития мышечной ткани у сельскохозяйственных животных. Для проведения молекулярно-генетического анализа у животных осуществляли отбор биологического материала с последующим выделением геномной ДНК стандартными методами. Анализ полиморфизма гена *MSTN* проводили с использованием метода полимеразной цепной реакции (ПЦР) [6, 7]. Для амплификации специфических участков ДНК применяли набор праймеров, разработанных для выявления полиморфных локусов исследуемых генов.

После проведения ПЦР полученные ампликоны подвергали рестрикционному анализу (PCR-RFLP) с использованием специфических эндонуклеаз рестрикции. Данный метод позволил выявить различия в длине рестрикционных фрагментов, обусловленные наличием различных аллельных вариантов исследуемых генов. Разделение фрагментов ДНК проводили методом электрофореза в агарозном геле с последующей визуализацией результатов в ультрафиолетовом свете.

Органолептическую оценку проводили на образцах мяса баранчиков, полученных после контрольного убоя в идентичных технологических условиях.

Для анализа использовали длиннейшую мышцу спины (*m. longissimusdorsi*). Образцы массой 400–500 г подвергали тепловой обработке с последующей дегустационной оценкой.

Варёное мясо. Варку проводили при температуре 95–98 °С до достижения кулинарной готовности и внутренней температуры 80–85 °С без добавления соли и специй. После охлаждения образцы нарезали на порции массой 20–25 г и подавали в кодированном виде.

Жареное мясо. Жарение осуществляли при температуре 180–200 °С до образования корочки и достижения внутренней температуры 75–80 °С. После приготовления образцы выдерживали 3–5 минут для стабилизации соков, затем подавали в дегустацию в тёплом виде.

Бульон. Бульон готовили из мясо-костного сырья при стандартном соотношении компонентов. Варку проводили при слабом кипении в течение 2–2,5 часов без добавления специй. После приготовления бульон фильтровали и охлаждали до 35–40 °С. Результаты обработаны с использованием методов вариационной статистики. Оценивали средние значения и межгрупповые различия между генотипами *MSTN_AG* и *MSTN_GG*. Дополнительно использовали элементы сравнительного анализа органолептических показателей.

Результаты исследования. Анализ результатов дегустационной оценки варёного мяса показал наличие выраженных различий между животными с генотипами *MSTN_AG* и *MSTN_GG* по основным органолептическим показателям. Наиболее существенное превосходство гетерозиготного генотипа *MSTN_AG* установлено по вкусовым характеристикам, средняя оценка составила 4,6 балла против 3,8 балла у животных с генотипом *MSTN_GG*, что свидетельствует о повышенной выраженности вкуса и более высокой потребительской привлекательности мяса. По показателю нежности мясо животных генотипа *MSTN_AG* также характеризовалось лучшими значениями. Средний балл составил 4,2 против 3,8 у генотипа *MSTN_GG*, что указывает на более мягкую и нежную консистенцию мышечной ткани. Полученные различия могут быть обусловлены особенностями влияния гена *MSTN* на развитие мышечных волокон и формирование структуры мышечной ткани. Соотношение дегустационных оценок варёного мяса по генотипам гена *MSTN* представлено на рис. 1.

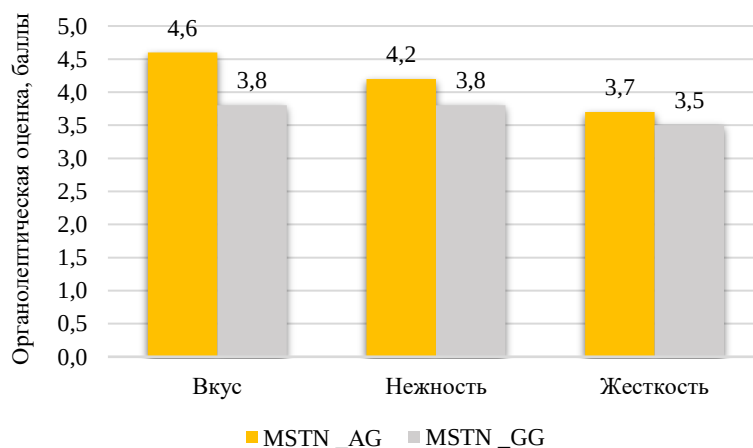


Рис. 1. Дегустационная оценка вареного мяса

Анализ результатов дегустационной оценки жареного мяса баранчиков с различными генотипами гена *MSTN* (*MSTN_AG* и *MSTN_GG*) выявил устойчивые различия по основным органолептическим показателям. По показателю цвета установлено преимущество животных генотипа *MSTN_AG*, средняя оценка которых составила 3,8 балла против 3,5 балла у *MSTN_GG*. Это указывает на более выраженную привлекательность внешнего вида мяса у гетерозиготных особей. По вкусовым характеристикам также отмечено превосходство генотипа *MSTN_AG* 3,7 балла против 3,2 балла у *MSTN_GG*. Данное различие свидетельствует о более высокой интенсивности и гармоничности вкуса мяса у гетерозиготных животных. Аналогичная тенденция наблюдается по показателю запаха, где средняя оценка составила 3,3 балла у *MSTN_AG* и 3,1 балла у *MSTN_GG*. Несмотря на относительно небольшую разницу, она подтверждает улучшенные ароматические свойства мяса у носителей гетерозиготного генотипа. Соотношение оценок жареного мяса по генотипам представлено на рис. 2.

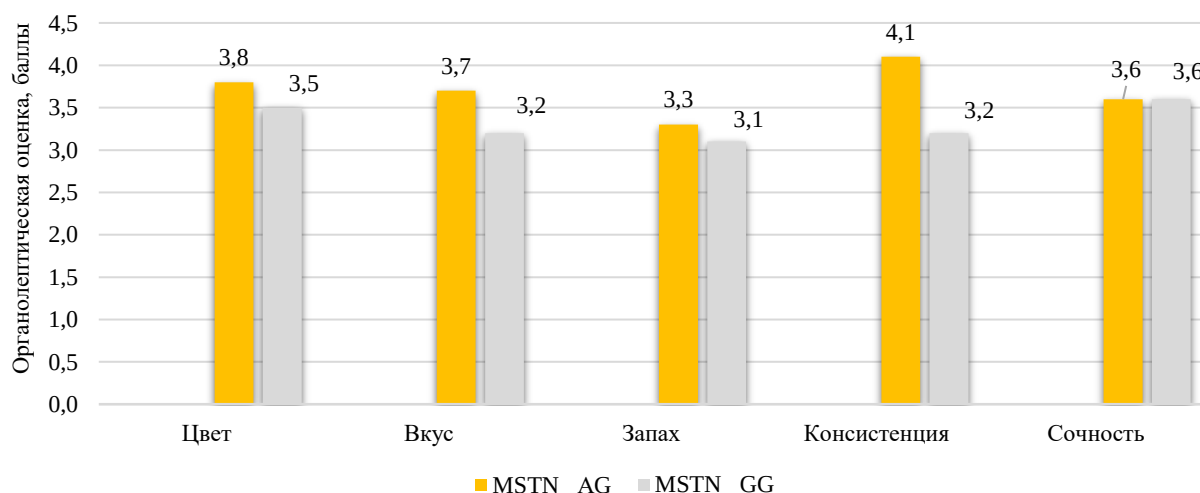


Рис. 2. Дегустационная оценка жареного мяса

Анализ результатов дегустационной оценки бульона, полученного из мяса баранчиков с генотипами *MSTN_AG* и *MSTN_GG*, показывает наличие как выраженных различий, так и отдельных сходств по органолептическим показателям (рис. 3). По показателю цвета различий между группами не выявлено, обе группы получили одинаковую среднюю оценку 3,2 балла, что свидетельствует о нейтральном влиянии генотипа *MSTN* на внешний вид. По вкусу также установлено полное совпадение результатов 3,9 балла в обеих группах. Это указывает на отсутствие генетически обусловленных различий по данному показателю в условиях проведенного исследования. Аналогичная ситуация наблюдается по показателю запаха, где оценки составили 3,2 балла как у животных с генотипом *MSTN_AG*, так и у *MSTN_GG*. Вместе с тем по показателю крепости бульона выявлены умеренные различия: у животных генотипа *MSTN_AG* средняя оценка составила 3,5 балла против 3,3 балла у *MSTN_GG*. Это может свидетельствовать о несколько более выраженной экстрактивности мяса у гетерозиготных животных. Наиболее заметные различия установлены по показателю наваристости 4,0 балла у *MSTN_AG* против 3,7 балла у *MSTN_GG*. Данное преимущество указывает на более высокую насыщенность бульона вкусо-ароматическими веществами при использовании сырья от животных с генотипом *MSTN_AG*.

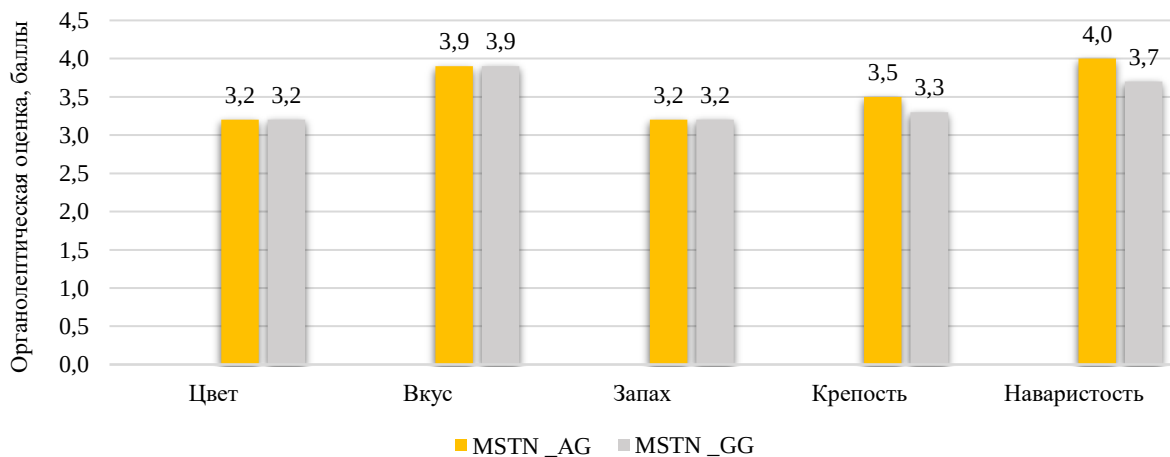


Рис. 3. Дегустационная оценка бульона

Обсуждение и заключение. Анализируя исследования других ученых, можно выделить работу [8] в которой установлено, что инактивация MSTN у овец сопровождается увеличением массы туши и площади мышечного глазка при сохранении стабильных показателей качества мяса, включая pH, водоудерживающую способность и кулинарные потери. Аналогичные данные получены в исследованиях, где отмечено, что генетически обусловленные изменения MSTN существенно влияют на ростовые характеристики животных, не ухудшая при этом качество мяса.

Дополнительные исследования последних лет [9] показывают, что активность сигнального пути MSTN/Smad тесно связана с показателями мраморности, нежности и структурными характеристиками мышечной ткани у овец различных пород. Установлено, что уровень экспрессии MSTN может быть ассоциирован с формированием технологических свойств мяса, включая его консистенцию и водоудерживающую способность.

Отдельные работы [1, 2] подтверждают, что мультилокусные генотипы MSTN ассоциированы не только с ростовыми показателями, но и с изменениями мясной продуктивности, включая убойный выход и морфологические характеристики туши. При этом ряд исследований отмечает отсутствие негативного влияния отдельных мутаций MSTN на базовые показатели качества мяса, что делает данный ген перспективным маркером для селекционной работы.

В целом установлено, что полиморфизм гена MSTN оказывает влияние на формирование органолептических характеристик мясной продукции, однако степень его выраженности зависит от вида кулинарной обработки. Полученные результаты подтверждают перспективность использования гена MSTN в качестве молекулярно-генетического маркера при селекции овец мясного направления продуктивности.

Список литературы/References

1. Широкова Н.В., Федоров В.Х., Ряска В.К. Молекулярно-генетические исследования полиморфизма генов CAST, MSTN. *Главный зоотехник*. 2025;(12):42–52. <https://doi.org/10.33920/sel-03-2512-05>
Shirokova NV, Fedorov VKh, Ryaska VK. Molecular genetic studies of CAST, MSTN gene polymorphism. *Chief Zootechnician*. 2025;(12):42–52. <https://doi.org/10.33920/sel-03-2512-05>
2. Shirokova NV, Fiodorov VK, Kazarova IG et al. Calpastatin and Myostatin Genes Polymorphism and their Association With Slaughter Traits in the Gashun Soviet Merino Breed Grown in Southern Russia. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*. 2025;39(2):233–241. <https://doi.org/10.33899/ijvs.2024.154790.4000>
3. Гаджиев З.К., Суржикова Е.С., Евлагина Д.Д., Кононова Л.В. Частота встречаемости селекционно-значимых генотипов генов CAST, GH, KAP1.3 у овец породы черноземельский меринос. *Аграрный научный журнал*. 2025;(10):107–113. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i10pp107-113>
Gadzhiev ZK, Surzhikova ES, Evlagina DD, Kononova LV. Frequency of Occurrence of Selectively Significant Genotypes of CAST, GH, KAP1 Genes.3 Black Earth Merino Sheep. *Agrarian Scientific Journal*. 2025;(10):107–113. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i10pp107-113>
4. Селионова М.И., Евлагина Д.Д. Генетические аспекты комолости у овец (обзор). *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025;(3):151–166. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2025-3-151-166>
Selionova MI, Evlagina DD. Genetic Aspects of Polledness in Sheep (review). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025;(3):151–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2025-3-151-166>
5. Гаджиев З.К., Суржикова Е.С., Евлагина Д.Д., Завгородняя Г.В. Полиморфизм генов GH, Kap1.3 и его связь с шерстной продуктивностью овец породы черноземельский меринос. *Сельскохозяйственный журнал*. 2025;18(2):50–59. <https://doi.org/10.48612/FARC/2687-1254/005.2.18.2025>
Gadzhiev ZK, Surzhikova ES, Evlagina DD, Zavgorodniaia GV. Polymorphism of the GH, KAP1.3 Genes and its Relation to the Wool Productivity of Chernozemelsky Merino Sheep Breed. *Agricultural Journal*. 2025;18(2):50–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.48612/FARC/2687-1254/005.2.18.2025>
6. Криворучко А.Ю., Сафарян Е.Ю., Скокова А.В., Каниболоцкая А.А., Яцык О.А., Алексеева С.М. Полиморфизм кодирующих участков гена FREM2 у Манычских мериносов. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2026;(1(83)):52–60. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2026-1-52-60>
Krivoruchko AY, Safaryan EY, Skokova AV, Kanibolotskaya AA, Yatsyk OA, Alekseeva SM. Polymorphism of the FREM2 Gene in the Coding Regions of the Manych Merino Sheep. *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*. (In Russ.) 2026;(1(83)):52–60. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2026-1-52-60>
7. Криворучко А.Ю., Скорых Л.Н., Криворучко О.Н., Каниболоцкая А.А., Яцык О.А., Кононова Л.В. и др. Поиск полиморфизмов гена FRY, связанных с параметрами живой массы у баранов породы маньчский меринос. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2026;27(2):435–447. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.435-447>

Krivoruchko AYu, Skorykh LN, Krivoruchko ON, Kanibolotskaya AA, Yatsyk OA, Kononova LV et al. Search for polymorphisms of the FRY gene associated with live weight parameters in Many Merino rams. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2026;27(2):435–447. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.435-447>

8. Chenchen Du, Xianhui Zhou, Ke Zhang, Shuhong Huang, Xiaolong Wang, Shiwei Zhou et al. Inactivation of the *MSTN* gene expression changes the composition and function of the gut microbiome in sheep. *BMC Microbiology*. 2022;22:273. <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02687-8>

9. He N, Lang X, Wang C, Lv C, Li M, Sun R, Zhang J. Expression of *MSTN*/Smad Signaling Pathway Genes and its Association With Meat Quality in Tibetan Sheep (*Ovis aries*). *Food Sci Nutr*. 2023;11(4):1836–1845. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3216>

Об авторах:

Надежда Васильевна Широкова, доктор биологических наук, доцент, заведующая кафедрой «Пищевые технологии» Донского государственного аграрного университета (346493, Российская Федерация, Ростовская область, пос. Персиановский, ул. Кривошлыкова, зд. 24), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), nadya.shirockowa@yandex.ru

Владимир Христофорович Федоров, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры «Биологии, морфологии и вирусологии» Донского государственного аграрного университета (346493, Российская Федерация, Ростовская область, пос. Персиановский, ул. Кривошлыкова, зд. 24), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), 9286109975@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.В. Широкова: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов;

В.Х. Федоров: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nadezhda V. Shirokova, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, The Head of the Department of Food Technologies, Don State Agrarian University (24 Krivoslykova St., Persianovsky Settlement, Rostov Region 346493, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), nadya.shirockowa@yandex.ru

Vladimir Kh. Fedorov, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Professor of the Department of Biology, Morphology and Virology, Don State Agrarian University (24 Krivoslykova St., Persianovsky Settlement, Rostov Region 346493, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), 9286109975@mail.ru

Author Contributions:

NV Shirokova: development of the study concept, formulation of research aims and objectives, data analysis, manuscript preparation, and formulation of conclusions;

VKh Fedorov: scientific supervision, analysis of research results, manuscript revision, and correction of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 19.03.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 16.04.2026

Принята к публикации/Accepted 29.04.2026

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX



УДК 331.45

Оригинальное теоретическое исследование

Подходы к формированию системы управления профессиональными рисками на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК

И.Г. Дейнека , А.С. Шаповалова

Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, Российская Федерация

ann_shap91@mail.ru

Аннотация

Введение. Предприятия сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса агропромышленного комплекса функционируют на стыке промышленного производства, ремонта, обслуживания и эксплуатации машин и технологического оборудования. Для данной сферы характерно сочетание технических, организационно-управленческих и человеческих факторов риска, связанных с применением энергонасыщенного оборудования, движущихся машин и механизмов, ручного и электрифицированного инструмента, подъёмно-транспортных операций, воздействием шума, вибрации, пыли, химических веществ и эргономических нагрузок. Правила по охране труда в сельском хозяйстве прямо относят к возможным вредным и опасным факторам движущиеся машины и механизмы, подвижные части оборудования, шум, вибрацию, запылённость, химические вещества, физические перегрузки и электрический ток.

В современных условиях сохраняется противоречие между формальным выполнением требований охраны труда и необходимостью предупреждения происшествий на основе риск-ориентированного управления. Недостаточная адаптация общих подходов к управлению профессиональными рисками к условиям сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК определяет актуальность исследования.

Материалы и методы. Объектом исследования выступают процессы управления профессиональными рисками на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК. Методическую основу составили анализ нормативно-правовой базы и научной литературы, системный и сравнительный анализ, а также моделирование управленческих процессов на основе цикла Деминга.

Результаты исследования. Установлено, что развитие подходов к управлению безопасностью труда в промышленно-аграрной сфере происходит от нормативно-процедурной и аналитико-статистической моделей к риск-ориентированной модели. Выявлены различия между реактивным и проактивным подходами по целям, временной ориентации, составу мероприятий, показателям оценки и степени вовлечённости персонала. Показано, что система управления профессиональными рисками должна рассматриваться как центральный элемент системы управления охраной труда и как составная часть интегрированной системы менеджмента предприятия, осуществляющего производство, ремонт, обслуживание или эксплуатационное сопровождение машин и оборудования АПК.

Обсуждение и заключение. Применение проактивного подхода и цикла Деминга обеспечивает переход от реагирования на последствия происшествий к их предупреждению, повышает результативность управленческих решений и способствует устойчивости производственных и сервисных процессов. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных положений при совершенствовании систем управления охраной труда на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения, ремонтных мастерских, сервисных подразделениях и организациях, эксплуатирующих машинно-тракторный парк. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой инструментов мониторинга, прогнозирования и многокритериальной оценки профессиональных рисков при работе с машинами и оборудованием АПК.

Ключевые слова: профессиональные риски, сельскохозяйственное машиностроение, технический сервис АПК, машины и оборудование АПК, охрана труда, система управления профессиональными рисками, риск-ориентированный подход, проактивное управление, интегрированная система менеджмента, цикл Деминга

Для цитирования. Дейнека И.Г., Шаповалова А.С. Подходы к формированию системы управления профессиональными рисками на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):15–24.

Original Theoretical Research

Approaches to the Formation of an Occupational Risk Management System at Enterprises of Agricultural Machinery Engineering and Technical Service of the Agro-Industrial Complex

Innesa G. Deyneka , Anna S. Shapovalova  

Luhansk State University named after Vladimir Dahl, Luhansk, Russian Federation

 ann_shap91@mail.ru

Abstract

Introduction. Enterprises of agricultural machinery engineering and technical service of the agro-industrial complex operate at the intersection of industrial production, maintenance, repair, adjustment, and operational support of machines and technological equipment used in agricultural production. This field is characterized by a combination of technical, organizational-managerial, and human risk factors associated with the use of power-intensive equipment, moving machines and mechanisms, hand and powered tools, lifting and transport operations, as well as exposure to noise, vibration, dust, chemical substances, and ergonomic loads. In modern occupational safety practice, there remains a contradiction between formal compliance with regulatory requirements and the need to prevent incidents through risk-based management. The insufficient adaptation of general approaches to occupational risk management to the specific conditions of agricultural machinery engineering and technical service in the agro-industrial complex highlights the relevance of the study.

Materials and Methods. The object of the study is the processes of occupational risk management at enterprises of agricultural machinery engineering and technical service of the agro-industrial complex. The methodological basis includes the analysis of regulatory documents and scientific literature, system and comparative analysis, as well as the modeling of management processes based on the Deming cycle.

Research Results. It has been established that the development of approaches to occupational safety management in industrial and agricultural-related production systems proceeds from regulatory-procedural and analytical-statistical models to a risk-based model. Differences between reactive and proactive approaches were identified in terms of objectives, time orientation, set of measures, assessment indicators, and the degree of personnel involvement. It is shown that the occupational risk management system should be considered as a central element of the occupational safety management system and as a component of the integrated management system of an enterprise engaged in the production, repair, maintenance, or operational support of machines and equipment for the agro-industrial complex.

Discussion and Conclusion. The application of a proactive approach and the Deming cycle ensures a transition from responding to the consequences of incidents to their prevention, improves the effectiveness of managerial decisions, and contributes to the sustainability of production, repair, and service processes. The practical significance of the study lies in the potential use of the proposed provisions to improve occupational safety management systems at agricultural machinery engineering enterprises, repair workshops, service departments, and organizations operating machinery and tractor fleets. Prospects for further research are associated with the development of tools for monitoring, forecasting, and multi-criteria assessment of occupational risks when working with machines and equipment of the agro-industrial complex.

Keywords: occupational risks, agricultural machinery engineering, technical service of the agro-industrial complex, machines and equipment of the agro-industrial complex, occupational safety, occupational risk management system, risk-based approach, proactive management, integrated management system, Deming cycle

For citation. Deyneka IG, Shapovalova AS. Approaches to the Formation of an Occupational Risk Management System at Enterprises of Agricultural Machinery Engineering and Technical Service of the Agro-Industrial Complex. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):15–24.

Введение. Предприятия сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса агропромышленного комплекса относятся к числу производственных систем с повышенной сложностью формирования профессиональных рисков. Это обусловлено сочетанием процессов изготовления, ремонта, технического обслуживания,

наладки и эксплуатационного сопровождения машин и оборудования, применяемых в растениеводстве, животноводстве, послеуборочной обработке продукции и иных технологических процессах АПК. В таких условиях профессиональный риск формируется не отдельным фактором, а совокупным воздействием технических, организационно-управленческих и человеческих компонентов производственной среды.

Значимость риск-ориентированного подхода в данной сфере подтверждается особенностями нормативного регулирования безопасности сельскохозяйственных работ. Правила по охране труда в сельском хозяйстве предусматривают необходимость безопасной эксплуатации производственных зданий, сооружений, машин, инструментов и оборудования, а также безопасность производственных процессов, сырья и материалов, используемых при проведении сельскохозяйственных работ¹. Международный стандарт ISO 4254-1:2013 устанавливает требования безопасности и способы их проверки для самоходных, навесных, полунавесных и прицепных сельскохозяйственных машин, а также предусматривает информирование пользователя о безопасных приёмах работы и остаточных рисках².

Безопасность технического обслуживания сельскохозяйственной техники является самостоятельным направлением анализа профессиональных рисков, поскольку ремонтные и сервисные операции сопровождаются воздействием комплекса производственных опасностей [1]. Особое значение имеют меры профилактики происшествий, связанных с сельскохозяйственными машинами, так как машинно-связанные инциденты рассматриваются в современных исследованиях как значимое направление предупреждения травматизма в сельском хозяйстве [2].

Вместе с тем формальное соблюдение нормативных требований не всегда обеспечивает достаточный уровень предупреждения опасных ситуаций. Для производственных систем, связанных с изготовлением, ремонтом и техническим обслуживанием машин, актуальным является переход от универсальных процедур оценки риска к более адаптированным подходам, учитывающим особенности конкретного производства [3]. При идентификации опасностей в производственных зонах перспективным является применение структурированных методик, позволяющих выявлять опасности, причины их возникновения, возможные последствия и меры управления риском [4]. Для машиностроительного производства характерно воздействие комплекса факторов, определяющих профессиональные риски для работников основных профессиональных групп [5].

Современные исследования в области анализа и управления рисками показывают, что развитие производственных систем сопровождается усложнением структуры неопределённости и ростом требований к методам предупреждения опасных событий. В современной теории риск рассматривается не только как вероятность неблагоприятного события, но и как категория, связанная с неопределённостью, последствиями и условиями принятия решений [6]. При выборе стратегий управления профессиональными рисками существенное значение имеет неопределённость исходной информации и экспертных оценок [7]. Данный подход имеет принципиальное значение для охраны труда, поскольку позволяет перейти от фиксации уже реализованных последствий к предупреждению рискообразующих процессов на ранних стадиях.

Несмотря на развитие нормативной базы и распространение риск-ориентированной терминологии, практика управления профессиональными рисками на промышленных предприятиях во многих случаях сохраняет формальный характер. Внедрение соответствующих процедур нередко сводится к составлению локальных документов, реестров опасностей и карт рисков без их полноценной интеграции в процессы производственного планирования, внутреннего контроля и принятия управленческих решений. Повышение результативности систем управления охраной труда связано с переходом к риск-ориентированному и процессному подходам, при которых охрана труда рассматривается как управляемая система, встроенная в процессы предприятия [8]. Использование опережающих показателей позволяет оценивать не только последствия уже произошедших происшествий, но и состояние профилактических процессов в системе управления охраной труда [9].

Отдельной научной проблемой остаётся недостаточная адаптация общих подходов к управлению профессиональными рисками к отраслевой специфике сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК. Существующие методы оценки риска нередко ориентированы либо на формальное соответствие нормативным требованиям, либо на ретроспективный анализ травматизма и профессиональной заболеваемости. При этом для сельскохозяйственного машиностроения как сложной социотехнической системы требуется учёт взаимосвязи технических параметров производства, организационной среды, поведения персонала и неопределённости экспертных оценок.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью научного обоснования подходов к формированию системы управления профессиональными рисками, ориентированной не только на выполнение обязательных процедур, но и на предупреждение опасностей, повышение управляемости рисков и

¹ Приказ Минтруда РФ от 27.10.2020 N 746Н «Об утверждении Правил по охране труда в сельском хозяйстве» (ред. от 29.04.2025)

² ISO 4254-1:2013. Agricultural machinery – Safety – Part 1: General requirements. Geneva: International Organization for Standardization; 2013

интеграцию механизмов охраны труда в общую систему менеджмента предприятия. Особую значимость данная задача приобретает в сельскохозяйственном машиностроении и техническом сервисе АПК, где результативность профилактических мер определяется полнотой учёта отраслевых факторов риска и способностью системы управления адаптироваться к изменяющимся производственным, ремонтным и сервисным процессам.

Целью исследования является обоснование проактивного подхода к формированию системы управления профессиональными рисками на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК и определение её места в интегрированной системе менеджмента предприятия.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: проанализировать эволюцию подходов к управлению безопасностью труда; выявить ограничения формального и преимущественно реактивного управления профессиональными рисками; обосновать значение процессного и риск-ориентированного подходов при построении системы управления профессиональными рисками; определить место данной системы в структуре интегрированной системы менеджмента предприятия сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК.

Материалы и методы. Объектом исследования являются процессы формирования и функционирования системы управления профессиональными рисками на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК. Предмет исследования составляют научно-методические подходы к идентификации опасностей, оценке профессиональных рисков и организации предупредительных управленческих воздействий в структуре системы управления охраной труда.

Исследование носит теоретико-методический характер и направлено на обобщение подходов к формированию системы управления профессиональными рисками применительно к предприятиям, деятельность которых связана с изготовлением, ремонтом, техническим обслуживанием, наладкой и эксплуатационным сопровождением машин и оборудования АПК.

Информационную основу исследования составили научные публикации по вопросам безопасности технического обслуживания сельскохозяйственной техники [1]. При анализе специфики машинно-связанных рисков учитывались современные исследования, посвящённые профилактике происшествий при работе с сельскохозяйственными машинами [2]. Подходы к оценке профессиональных рисков рассматривались с учётом необходимости адаптации методик к особенностям конкретной производственной системы [3]. При характеристике процессов идентификации опасностей учитывались структурированные методы анализа опасностей в производственных зонах [4]. Для обоснования отраслевой специфики профессиональных рисков использовались исследования, посвящённые оценке риска здоровью работников основных профессиональных групп машиностроительного производства [5].

При проведении исследования также учитывались положения нормативных и методических документов, регламентирующих процессы идентификации опасностей, оценки рисков и разработки мер управления в области охраны труда, включая требования охраны труда в сельском хозяйстве и требования безопасности сельскохозяйственных машин. Указанные нормативные документы приведены в подстрочных ссылках во введении.

Методическую основу работы составили системный анализ, сравнительный анализ, обобщение научных подходов и структурно-логическое моделирование. Системный анализ использовался для определения места системы управления профессиональными рисками в общей структуре управления предприятием сельскохозяйственного машиностроения или технического сервиса АПК. Сравнительный анализ применялся для сопоставления реактивного и проактивного подходов к обеспечению безопасности труда, а также для характеристики различных подходов к оценке профессиональных рисков при работе с машинами, технологическим оборудованием, инструментом и ремонтно-сервисными процессами. Метод обобщения использовался при выделении ключевых признаков современных моделей управления профессиональными рисками и типичных проблем их внедрения на предприятиях. Структурно-логическое моделирование применялось для представления эволюции подходов к управлению безопасностью труда и обоснования места системы управления профессиональными рисками в интегрированной системе менеджмента предприятия.

Исследование выполнялось поэтапно. На первом этапе был проведён анализ научных публикаций и нормативно-методических подходов, посвящённых управлению профессиональными рисками, что позволило выявить основные направления эволюции взглядов на безопасность труда: от нормативно-процедурной и аналитико-статистической моделей к риск-ориентированной модели управления. На втором этапе выполнено сопоставление реактивного и проактивного подходов с позиции целей управления, временной ориентации, набора применяемых мероприятий, используемых показателей и степени вовлечённости персонала. На третьем этапе было проведено обобщение подходов к структурированию процессов идентификации опасностей, оценки рисков, контроля результативности и непрерывного совершенствования СУПР на основе процессной логики управления охраной труда [8]. На четвёртом этапе обосновано место системы управления профессиональными рисками в системе

управления охраной труда и в общей системе менеджмента предприятия сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК.

При анализе исходили из того, что идентификация опасностей является исходным и методически определяющим этапом функционирования системы управления профессиональными рисками, поскольку именно от полноты выявления опасных и вредных производственных факторов зависит достоверность их последующей оценки и выбор предупредительных мер. Особое внимание уделялось опасностям, характерным для предприятий сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК: рискам, связанным с эксплуатацией технологического оборудования, организацией рабочих мест, воздействием физических и химических факторов, а также влиянием человеческого фактора на возникновение инцидентов и травм [5]. При этом специфика технического сервиса АПК требует учитывать риски, возникающие на стадиях ремонта, обслуживания, наладки и эксплуатационного сопровождения сельскохозяйственной техники [1].

Выбор указанных методов обусловлен междисциплинарным характером рассматриваемой проблемы. Для обоснования подходов к формированию СУПР в сельскохозяйственном машиностроении и техническом сервисе АПК необходимо учитывать одновременно отраслевые особенности производственных и ремонтно-сервисных процессов, методологию риск-ориентированного управления, принципы процессной организации СУОТ и современные представления о превентивном управлении профессиональными рисками [8]. При оценке результативности системы управления охраной труда особое значение имеют опережающие показатели, позволяющие оценивать состояние профилактических процессов до наступления неблагоприятных событий [9].

Результаты исследования. Проведённый теоретико-методический анализ показал, что развитие подходов к обеспечению безопасности труда в производственных системах характеризуется последовательным переходом от нормативно-процедурной модели к аналитико-статистической, а затем к риск-ориентированной модели управления. Нормативно-процедурная модель ориентирована преимущественно на соблюдение обязательных требований, инструкций и регламентов, тогда как оценка состояния охраны труда в её рамках во многом строится на фиксации уже произошедших нарушений и происшествий. Аналитико-статистическая модель расширяет информационную базу за счёт использования данных о травматизме, аварийности и профессиональной заболеваемости, однако также в значительной степени сохраняет реактивный характер. В отличие от них риск-ориентированная модель предполагает систематическую идентификацию опасностей, анализ факторов риска и разработку предупредительных мер, направленных на недопущение неблагоприятных событий до их реализации [8].

Представленная на рис. 1 эволюция моделей управления безопасностью труда отражает смену управленческих акцентов от формального контроля соблюдения требований к системному управлению профессиональными рисками.

Указанная эволюция подходов имеет общий характер для промышленных предприятий, однако для сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК она приобретает особое значение в связи с сочетанием производственных, ремонтных, сервисных и эксплуатационных процессов. В этих условиях переход к риск-ориентированной модели позволяет учитывать не только уже произошедшие происшествия, но и потенциальные опасности, возникающие на разных стадиях жизненного цикла машин и оборудования.

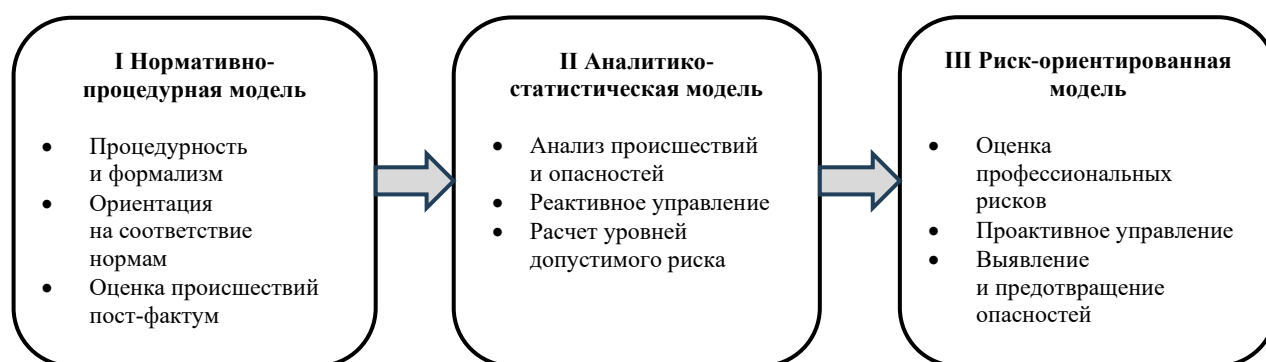


Рис. 1. Эволюция моделей управления безопасностью

Представленная схема отражает универсальную логику развития управления безопасностью труда: от контроля соблюдения требований и анализа происшествий к проактивному управлению профессиональными рисками. Применительно к предприятиям сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК данная логика позволяет связать идентификацию опасностей, оценку рисков и разработку предупредительных

мероприятий с особенностями изготовления, ремонта, технического обслуживания и эксплуатационного сопровождения машин и оборудования.

Для производственных систем, связанных с изготовлением, ремонтом и техническим обслуживанием машин, риск-ориентированная модель требует адаптации процедур оценки риска к особенностям конкретного предприятия и характера выполняемых работ [3]. При этом идентификация опасностей должна рассматриваться как исходный этап управления профессиональными рисками, поскольку именно от полноты выявления опасностей зависит достоверность последующей оценки риска и выбор мер управления [4].

Для более детального сопоставления указанных подходов и выявления их принципиальных различий целесообразно рассмотреть их сравнительные характеристики. Сравнительная характеристика реактивного и проактивного подходов применительно к отрасли сельскохозяйственного машиностроения приведена в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика реактивного и проактивного подходов

Критерий сравнения	Реактивный подход	Проактивный подход
Основная цель	Реагирование на уже произошедшие несчастные случаи и инциденты	Предотвращение несчастных случаев и инцидентов до их возникновения
Временная ориентация	Ориентация на прошлое (анализ того, что уже случилось)	Ориентация на будущее (прогнозирование и предупреждение возможных событий)
Ключевые мероприятия	Расследование несчастных случаев, устранение последствий, наказание виновных	Идентификация опасностей, оценка и управление рисками, обучение персонала, внедрение превентивных мер
Индикаторы оценки	Количество несчастных случаев, дней нетрудоспособности, тяжесть травм (запаздывающие показатели)	Количество выявленных опасностей, проведенных инструктажей, устраненных рисков (опережающие показатели)
Отношение к инцидентам	Инцидент — это сбой в работе, требующий расследования и наказания	Инцидент — это возможность для обучения и улучшения системы управления
Уровень вовлеченности персонала	Низкий. Персонал рассматривается как объект управления.	Высокий. Персонал активно вовлекается в процесс выявления опасностей и управления рисками
Экономическая эффективность	Высокие затраты на ликвидацию последствий, выплату компенсаций, штрафы	Инвестиции в превентивные меры окупаются за счет снижения потерь от несчастных случаев и повышения производительности труда

В результате сравнительного анализа установлено, что различия между реактивным и проактивным подходами проявляются по целям управления, временной ориентации, составу мероприятий, характеру используемых показателей и степени вовлеченности персонала. Реактивный подход ориентирован на расследование несчастных случаев, устранение последствий и применение корректирующих действий по итогам уже произошедших инцидентов. Проактивный подход, напротив, направлен на выявление потенциальных опасностей, предупреждение отклонений, использование опережающих индикаторов и включение работников в процессы управления безопасностью труда. Для предприятий сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК проактивная модель является более адекватной, поскольку позволяет воздействовать не только на последствия, но и на причины формирования профессиональных рисков [8]. Использование опережающих индикаторов позволяет оценивать не только результаты уже произошедших происшествий, но и состояние профилактических процессов в системе управления охраной труда [9].

Для предприятий сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК профессиональные риски целесообразно рассматривать с учётом жизненного цикла машин и оборудования: проектирование и изготовление, эксплуатация, техническое обслуживание, ремонт, наладка, транспортирование, хранение и вывод из эксплуатации. Исследования безопасности технического обслуживания сельскохозяйственной техники показывают, что ремонтные и сервисные операции сопровождаются комплексом производственных опасностей и требуют отдельного анализа в системе управления профессиональными рисками [1]. При эксплуатации и техническом сервисе машин АПК дополнительно возрастает значение факторов, связанных с работой на открытом воздухе, сезонной интенсивностью работ, ограниченными сроками обслуживания техники, а также необходимостью

выполнения ремонтных операций в полевых или производственно-складских условиях. Современные исследования профилактики машинно-связанных происшествий в сельском хозяйстве подтверждают необходимость системного подхода к снижению рисков при работе с сельскохозяйственными машинами [2].

Одним из результатов исследования стало выявление ключевых ограничений, препятствующих полноценному внедрению риск-ориентированного подхода на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК. К числу наиболее значимых ограничений относятся фрагментарность методической базы оценки профессиональных рисков, формальный характер ряда процедур в системе управления охраной труда, недостаточная интеграция результатов оценки риска в процессы производственного и управленческого планирования, дефицит достоверных данных о состоянии производственной среды, инцидентах и профессионально обусловленных нарушениях здоровья, а также недооценка человеческого фактора и культуры безопасности. Необходимость адаптации процедур оценки риска к условиям конкретного производства является одним из условий повышения результативности управления профессиональными рисками [3]. Дополнительным ограничением выступает неопределённость исходной информации и экспертных оценок, влияющая на выбор управленческих решений в области профессионального риска [7].

Установлено также, что в условиях сельскохозяйственного машиностроения профессиональный риск должен рассматриваться как результат взаимодействия нескольких групп факторов. К ним относятся технические факторы, связанные с состоянием оборудования, особенностями технологических процессов и организацией производственной зоны; организационно-управленческие факторы, определяющие качество обучения, коммуникации, контроля и распределения ответственности; а также человеческие факторы, связанные с компетентностью работников, особенностями поведения, дисциплиной и уровнем сформированности культуры безопасности. Для машиностроительного производства характерно воздействие комплекса факторов, определяющих профессиональные риски для работников основных профессиональных групп [5]. Такой подход позволяет перейти от упрощённого понимания риска как изолированного воздействия отдельной опасности к его рассмотрению как системного свойства производственной среды [6]. При этом анализ организационных и человеческих факторов риска требует учёта неопределённости экспертных оценок [7].

В ходе исследования обосновано, что практическая реализация риск-ориентированного подхода наиболее последовательно осуществляется в рамках процессной логики управления охраной труда. На стадии планирования определяются цели в области охраны труда, проводится идентификация опасностей и формируется система мероприятий по предупреждению профессиональных рисков. На стадии выполнения реализуются организационные, технические и профилактические меры. На стадии проверки осуществляются мониторинг, внутренний контроль, анализ инцидентов и оценка результативности. На стадии совершенствования принимаются корректирующие решения, направленные на повышение эффективности системы управления. Процессный подход позволяет рассматривать охрану труда не как совокупность разрозненных процедур, а как управляемую систему, встроенную в деятельность предприятия [8]. На стадии проверки и совершенствования целесообразно использовать опережающие показатели результативности системы управления охраной труда [9].

Ещё одним результатом исследования стало уточнение места системы управления профессиональными рисками в структуре управления предприятием. В сельскохозяйственном машиностроении и техническом сервисе АПК проактивный подход усиливает роль СУПР как инструмента предупреждения опасных событий и обоснования управленческих решений. СУПР занимает центральное место в системе охраны труда, выступая механизмом реализации процессного подхода с планированием мер, контролем и последующим совершенствованием [8]. Система управления профессиональными рисками одновременно интегрируется в общую систему менеджмента организации, обеспечивая взаимосвязь стратегических целей предприятия, производственных процессов, ремонтно-сервисной деятельности и механизмов контроля. Ранее обоснованные подходы к оценке результативности СУОТ на промышленном предприятии могут быть использованы при адаптации СУПР к условиям сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК [10].

Место СУПР в интегрированной системе менеджмента может быть представлено в виде обобщённой схемы, применимой к промышленным предприятиям различного профиля (рис. 2). Для предприятий сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК данная схема позволяет показать, что управление профессиональными рисками не ограничивается отдельными мероприятиями по охране труда, а должно быть встроено в производственные, ремонтные, сервисные и управленческие процессы.

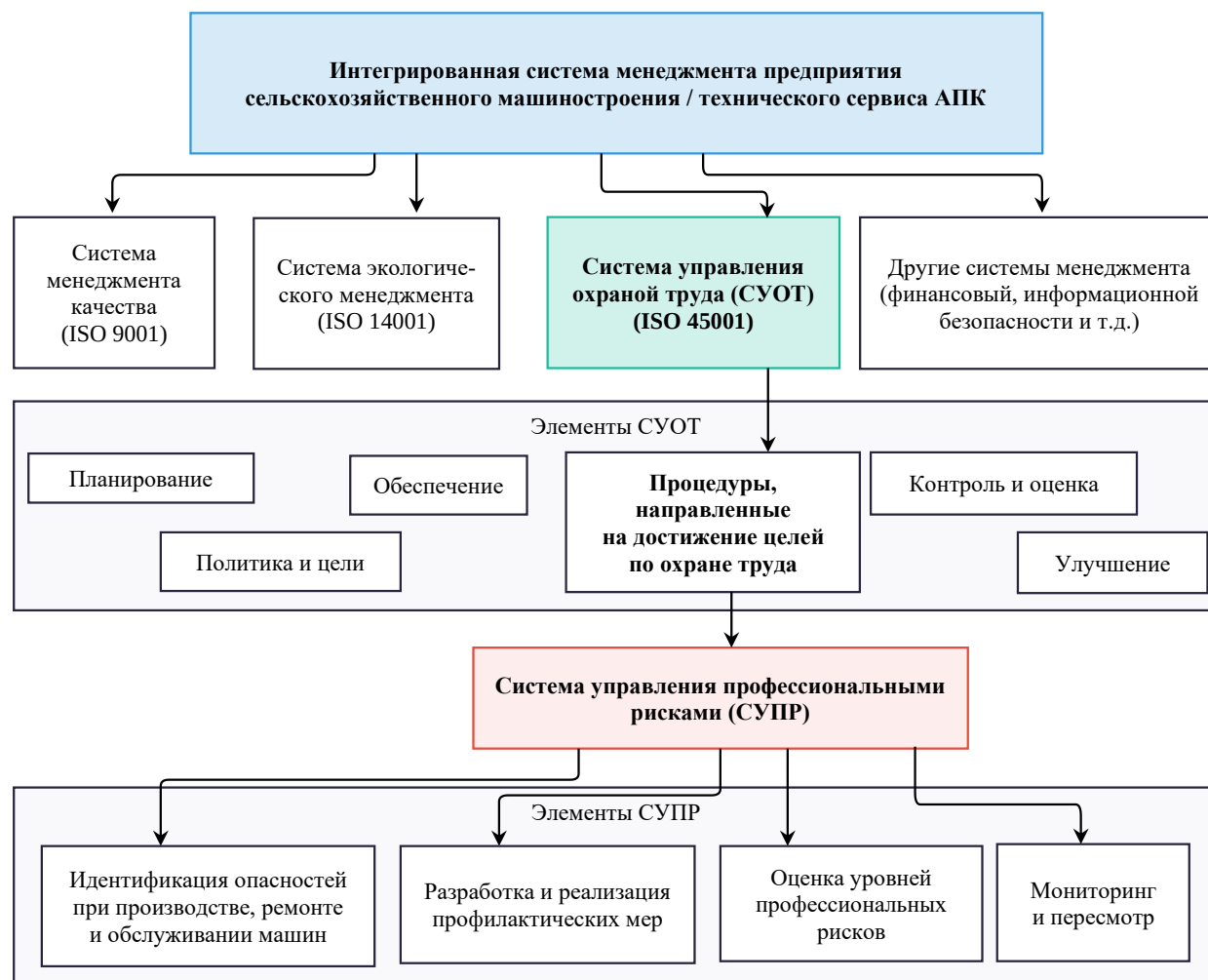


Рис. 2. Место СУПР в системе менеджмента предприятия сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК

Представленная схема носит универсальный характер, однако её применение к сельскохозяйственному машиностроению и техническому сервису АПК позволяет уточнить место СУПР в управлении безопасностью работ, связанных с изготовлением, ремонтом, техническим обслуживанием и эксплуатационным сопровождением машин и оборудования. В таком контексте СУПР выступает связующим элементом между требованиями охраны труда, производственными процессами, техническим сервисом и управленческими решениями предприятия.

Проведённый анализ также показал, что дальнейшее развитие подходов к управлению профессиональными рисками в сельскохозяйственном машиностроении и техническом сервисе АПК связано с переходом от преимущественно описательных и формально-классификационных процедур к более чувствительным аналитическим инструментам. В современных исследованиях это связывается с использованием опережающих показателей результативности, структурированием факторов риска и применением методов многокритериального анализа для обоснования управленческих приоритетов [9]. Для предприятий сельскохозяйственного машиностроения такой подход представляет особую ценность, поскольку позволяет учитывать сложную структуру производственных рисков и обосновывать выбор профилактических мероприятий в условиях ограниченности ресурсов и неполноты исходной информации [7].

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют утверждать, что для предприятий сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК переход к риск-ориентированному управлению охраной труда имеет не частный, а системный характер. В отличие от формально-процедурной модели, ориентированной преимущественно на соблюдение обязательных требований и анализ уже произошедших происшествий, проактивный подход позволяет рассматривать безопасность труда как управляемый процесс, встроенный в общую логику производственной, ремонтной и сервисной деятельности предприятия [8].

Для сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК это особенно важно, поскольку профессиональные риски формируются не под воздействием одного изолированного фактора, а как результат взаимодействия технологических, организационно-управленческих и человеческих компонентов производственной

среды. Такая многофакторность характерна для машиностроительного производства и требует комплексного подхода к выявлению, оценке и предупреждению профессиональных рисков [5].

Проведённое исследование показывает, что ограниченность действующих практик связана не только с недостатками отдельных методов оценки риска, но и с более глубокими организационно-методическими причинами. Формальное внедрение процедур идентификации опасностей и оценки рисков без включения их результатов в процессы планирования, контроля, обучения и принятия управленческих решений снижает профилактический потенциал системы управления охраной труда. В сфере технического сервиса сельскохозяйственной техники дополнительное значение имеют риски, возникающие при ремонтных, сервисных и наладочных операциях [1].

В этой связи СУПР должна рассматриваться не как изолированный набор документов и процедур, а как функциональное ядро СУОТ, обеспечивающее связь между анализом условий труда, управленческими решениями и совершенствованием производственной деятельности. Такой подход позволяет уточнить место системы управления профессиональными рисками в структуре управления предприятием сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК: СУПР выступает одновременно центральным элементом системы управления охраной труда и составной частью интегрированной системы менеджмента организации.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии представлений о профессиональном риске как объекте системного управленческого воздействия. В рамках данного подхода риск рассматривается не только как вероятность неблагоприятного события, но и как категория, связанная с неопределённостью, последствиями и условиями принятия решений [6]. Это особенно важно для анализа организационных и человеческих факторов риска, где исходная информация часто имеет неполный, экспертный или качественный характер.

Практическая значимость работы состоит в том, что сформулированные положения могут быть использованы при совершенствовании локальных систем управления охраной труда на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения, в ремонтных мастерских, сервисных подразделениях и организациях, эксплуатирующих машинно-тракторный парк. Прежде всего это касается актуализации реестров опасностей и рисков, разработки профилактических мероприятий, совершенствования программ обучения, повышения вовлечённости работников и обоснования управленческих решений в области охраны труда.

Полученные результаты также позволяют сделать вывод о необходимости дальнейшего развития аналитического инструментария оценки профессиональных рисков. Для сложных производственных и ремонтно-сервисных систем, характеризующихся многофакторностью, вариативностью технологических процессов и значительной долей экспертных оценок, недостаточно использовать только описательные, матричные или формально-классификационные процедуры. Перспективным направлением является применение методов многокритериального анализа, позволяющих структурировать факторы риска, обосновывать приоритетность профилактических мер и использовать опережающие индикаторы результативности системы управления охраной труда [9].

В развитие данного положения следует отметить, что дальнейшее совершенствование СУПР в сельскохозяйственном машиностроении и техническом сервисе АПК связано с учётом неопределённости экспертных оценок, характерной для анализа организационных и человеческих факторов риска [7]. Это открывает перспективы использования более гибких моделей, сочетающих риск-ориентированный подход, многокритериальный анализ и инструменты формализации нечеткой информации.

Таким образом, формирование системы управления профессиональными рисками на основе проактивного подхода следует рассматривать как необходимое условие повышения уровня безопасности труда, устойчивости производственных, ремонтных и сервисных процессов, а также качества управленческих решений на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса АПК. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой прикладных моделей количественной и многокритериальной оценки профессиональных рисков, адаптированных к отраслевой специфике сельскохозяйственного машиностроения, а также с созданием цифровых инструментов мониторинга и прогнозирования опасных производственных ситуаций.

Список литературы/References

1. Martínez-Casariego MÁ, Vilkevičius G, Mioldažys A, Mioldažys R. Analysis of Maintenance Safety Problems in Agriculture. *Rural Development* 2011: *Engineering and Environment of Biosystems*. 2011:366–371.
2. Surendran A, McSharry J, Di Domenico R, Meredith D, Meade O, Malone S, O'Hora D. Deconstruction of farm machine-related safety interventions: a systematic review and narrative synthesis. *Annals of Work Exposures and Health*. 2025;69(3):233–250. <https://doi.org/doi:10.1093/annweh/wxae105>
3. Combetti L, Demichela M. Customised risk assessment in manufacturing: A step towards the future of occupational safety management. *Safety Science*. 2022;154:105809. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105809>
4. Domínguez CR, Pozos Mares JI, Zambrano Hernández RG. Hazard identification and analysis in work areas within the Manufacturing Sector through the HAZID methodology. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;145: 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.049>

5. Валеева Э.Т., Галимова Р.Р., Степанов Е.Г. Оценка априорного риска здоровью работников основных профессиональных групп производства машиностроения. *Медицина труда и экология человека*. 2021;(3(27)):96–108. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10307>
- Valeeva ET, Galimova RR, Stepanov EG. Assessment of a Priori Health Risk for Workers in the Main Occupational Groups in Engineering Industry. *Occupational Health and Human Ecology*. 2021;(3(27)):96–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10307>
6. Aven T. Risk Assessment and Risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016;253(1):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
7. Brocal F, Paltrinieri N, González-Gaya C, Sebastián MA, Reniers G. Approach to the Selection of Strategies for Emerging Risk Management Considering Uncertainty as the Main Decision Variable in Occupational Contexts. *Safety Science*. 2021;134:105041. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105041>
8. Мажкенев С.А. Новая концепция управления охраной труда на основе риск-ориентированного и процессного подходов. *Экономика труда*. 2022;9(9):1373–1390. <https://doi.org/10.18334/et.9.9.116308>
- Mazhkenov SA. A New Concept of Occupational Safety Based on Risk and Process-oriented Approaches. *Russian Journal of Labour Economics*. 2022;9(9):1373–1390. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/et.9.9.116308>
9. Podgórski D. Measuring Operational Performance of OSH Management System — A Demonstration of AHP-based Selection of Leading Key Performance Indicators. *Safety Science*. 2015;73:146–166. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.018>
10. Дейнека И.Г., Шаповалова А.С. Результативность работы системы управления охраной труда на промышленном предприятии. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки*. 2025;1(2):94–104.
- Deyneka IG, Shapovalova AS. The Effectiveness of the Labor Protection Management System at an Industrial Enterprise. *Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences*. 2025;(1(2)):94–104. (In Russ.)

Об авторах:

Иннеса Григорьевна Дейнека, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Легкой и пищевой промышленности» Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, Российская Федерация, Луганская Народная Республика, г. Луганск, кв. Молодежный, д. 20А), [SPIN-код](#), [ORCID](#), kaf_lipp@mail.ru

Анна Сергеевна Шаповалова, аспирант кафедры «Легкой и пищевой промышленности» Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, Российская Федерация, Луганская Народная Республика, г. Луганск, кв. Молодежный, д. 20А), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), ann_shap91@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

И.Г. Дейнека: разработка концепции, методология, научное руководство, научное редактирование.

А.С. Шаповалова: исследование, формальный анализ, визуализация, написание черновика.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Innesa G. Deyneka, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Light and Food Industry, Lugansk State University named after Vladimir Dahl (20A, Molodejnyy qv., Lugansk, 291034, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), kaf_lipp@mail.ru

Anna S. Shapovalova, postgraduate student of the Department of Light and Food Industry, Lugansk State University named after Vladimir Dahl (20A, Molodejnyy qv., Lugansk, 291034, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), ann_shap91@mail.ru

Author Contributions:

Deyneka IG: conceptualization, methodology, supervision.

Shapovalova AS: investigation, formal analysis, visualization, writing the original draft.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 15.04.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 29.04.2026

Принята к публикации/Accepted 14.05.2026

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

SOIL SCIENCE



УДК 579.222.3

Оригинальное эмпирическое исследование

Валовой химический состав антропогенно-преобразованных почв федеральной территории «Сириус»

Н.В. Сальник^{1,2}  , С.Н. Горбов^{1,2} , Д.И. Бузин¹ , И.П. Лобзенко¹ ¹ Научно-технологический университет «Сириус», Сириус, Российская Федерация² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация salnik@sfedu.ru

Аннотация

Введение. Антропогенно-преобразованные почвы федеральной территории «Сириус» сформированы в условиях масштабной инженерной планировки, проведённой при подготовке Олимпийских игр 2014 года и последующего градостроительного развития Имеретинской низменности. Поверхностные горизонты этих почв сложены привезённым материалом тёмногумусового горизонта (AU) чернозёма миграционно-сегрегационного, который в условиях влажного субтропического климата подвергается не свойственной чернозёмам трансформации. Цель работы — оценить особенности валового химического состава антропогенно-преобразованных почв ФТ «Сириус» и характер ранней стадии трансформации чернозёмного материала с применением геохимических индексов выветривания и педогенеза.

Материалы и методы. Объекты исследования — антропогенно-преобразованные почвы территорий ФТ «Сириус», функционирующие 10–12 лет. Эталонные объекты — горизонты AU и Cca чернозёма миграционно-сегрегационного. Валовое содержание макроэлементов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) портативным анализатором «МеталлТест». Для интерпретации применены индексы CIA, Ki, Kr.

Результаты исследования. В рекультивационно-гумусовом горизонте RAT установлено статистически значимое снижение SiO₂ при одновременном повышении Al₂O₃ и Fe₂O₃ по сравнению с генетически однородным горизонтом AU. По CaO, MgO и K₂O значимых различий не выявлено. По всем интегральным коэффициентам и большинству макроэлементов установлены достоверные различия RAT–Cca, что подтверждает существенную трансформацию чернозёмного материала за 10–12 лет.

Обсуждение и заключение. Выявленный сдвиг отражает раннюю стадию субтропического гипергенеза: декарбонатизацию, вынос оснований и относительное накопление полуторных оксидов в условиях промывного водного режима при сохранении карбонатно-щёлочного резерва, наследуемого от исходного чернозёма. Полученные результаты обосновывают необходимость регулярного геохимического мониторинга городских почв ФТ «Сириус» и могут быть использованы при разработке регламентов рекультивации в зонах влажных субтропиков.

Ключевые слова: валовой химический состав, макроэлементы, рекультивационный горизонт, урбопедогенез, антропогенно-преобразованные почвы, индексы выветривания, чернозём, Имеретинская низменность

Финансирование. Результаты получены при финансовой поддержке проекта, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 3-03 от 18.02.2025).

Для цитирования. Сальник Н.В., Горбов С.Н., Бузин Д.И., Лобзенко И.П. Валовой химический состав антропогенно-преобразованных почв Федеральной территории «Сириус». *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):25–32.

Total Chemical Composition of Anthropogenically Transformed Soils of the Sirius Federal Territory

Nadezhda V. Salnik^{1,2}  , Sergey N. Gorbov^{1,2} , Daniil I. Buzin¹ , Ilia P. Lobzenko¹ 

¹ Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russian Federation

² Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 salnik@sfedu.ru

Abstract

Introduction. Anthropogenically transformed soils of the Sirius Federal Territory were formed following of large-scale engineering levelling carried out during preparation for the 2014 Olympics and subsequent urban development of the Imeretinskaya Lowland. The surface horizons of these soils are composed of imported material from the dark-humus horizon (AU) of Halpic Chernozem, which, under the humid subtropical climate, undergoes transformation atypical of chernozems. The aim of the study is to assess the features of the bulk chemical composition of the anthropogenically transformed soils of the Sirius Federal Territory and the nature of the early stage of transformation of the chernozem material using geochemical indices of weathering and pedogenesis.

Materials and Methods. The study objects are anthropogenically transformed soils of the Sirius Federal Territory that have been functioning for 10–12 years. The reference objects are the AU and Cca horizons of Halpic Chernozem. The bulk content of macroelements was determined by X-ray fluorescence (XRF) analysis using a portable MetallTest analyzer. The CIA, Ki, and Kr indices were used for interpretation.

Research Results. A statistically significant decrease in SiO₂ along with a simultaneous increase in Al₂O₃ and Fe₂O₃ was established in the reclamation–humus horizon RAT compared with the genetically homogeneous AU horizon. No significant differences were detected for CaO, MgO, and K₂O. For all integral coefficients and most macroelements, significant RAT–Cca differences were found, which confirms the substantial transformation of the chernozem material over 10–12 years.

Discussion and Conclusion. The observed shift reflects the early stage of subtropical hypergenesis: decarbonatization, leaching of bases, and relative accumulation of sesquioxides under a leaching water regime, while preserving the carbonate–alkaline reserve inherited from the original Halpic Chernozem. The results obtained substantiate the need for regular geochemical monitoring of urban soils of the Sirius Federal Territory and can be used in the development of reclamation regulations for humid subtropical zones.

Keywords: bulk chemical composition, macroelements, reclamation horizon, urbopedogenesis, anthropogenically transformed soils, weathering indices, Chernozem, Imeretinskaya Lowland

Funding. The results were obtained with the financial support of the project implemented within the framework of the state programme of the Sirius Federal Territory "Scientific and Technological Development of the Sirius Federal Territory" (Agreement No. 3-03 of 18.02.2025).

For citation. Salnik NV, Gorbov SN, Buzin DI, Lobzenko IP. Total Chemical Composition of Anthropogenically Transformed Soils of the Sirius Federal Territory. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):25–32.

Введение. Урбанизация городских территорий неизбежно сопровождается формированием почвенного покрова, существенно отличающегося по своим свойствам от зональных естественных почв. Антропогенно-преобразованные почвы занимают значительную часть городских ландшафтов и характеризуются нарушенной профильной организацией, эклектичным валовым составом и специфическим геохимическим функционированием [1, 2]. Особый интерес представляют территории, на которых процессы урбопедогенеза протекают в нетипичных для исходного почвенного материала климатических условиях, что приводит к ускоренной и нелинейной трансформации почвенной массы.

Федеральная территория «Сириус», расположенная в пределах Имеретинской низменности на побережье Чёрного моря, представляет собой уникальный объект для подобных исследований. Природный почвенный покров этой территории до начала олимпийского строительства 2007–2014 годов был представлен преимущественно аллювиально-болотными и аллювиально-луговыми почвами, формировавшимися в дельте реки Мзымта в условиях полугидроморфного и гидроморфного режимов увлажнения. Зональными почвами прилегающих территорий служат желтозёмы и бурозёмы, типичные для влажных субтропиков Черноморского побережья Кавказа [3–5].

В ходе масштабной инженерной планировки естественный почвенный покров был практически полностью уничтожен или погребён, а на его месте сформированы реплантозёмы, поверхностный горизонт которых сложен привезённым материалом.

Современные исследования антропогенно-преобразованных почв в России активно развиваются благодаря работам Прокофьевой Т.В., Герасимовой М.И., Безугловой О.С., Горбова С.Н., Васенева В.И., Ивашенко К.В. и других [1–2, 6–7]. Применительно к городам Юга России наиболее последовательно изучены почвы Ростовской агломерации, для которой установлены закономерности перераспределения углерода [8, 9], профилей тяжёлых металлов [10] и направленности элементарных почвообразовательных процессов [11]. Однако в отношении городских почв влажных субтропиков Черноморского побережья объём накопленной информации существенно меньше; особенно скудно представлены данные по валовому химическому составу антропогенно-преобразованных почв и его динамике в условиях ФТ «Сириус».

Существующий пробел в научном знании заключается в отсутствии количественной геохимической характеристики начальной стадии трансформации привезённого материала под воздействием влажного субтропического климата, выраженной через систему интегральных индексов выветривания и педогенеза. Решение данной задачи имеет как фундаментальное значение для теории урбопедогенеза, так и прикладное – для разработки регламентов рекультивации и почвенно-экологического мониторинга в новых градостроительных зонах субтропиков.

Цель работы — проанализировать валовое содержание макроэлементов в антропогенно-преобразованных почвах ФТ «Сириус» и охарактеризовать особенности трансформации их минеральной части в условиях урбопедогенеза с применением геохимических индексов выветривания и педогенеза.

Материалы и методы

Объекты исследования. В качестве объекта исследования выступают городские почвы ФТ «Сириус», представленные антропогенно-преобразованными вариациями, сформированными в результате инженерной планировки территории. Поверхностные рекультивационно-гумусовые горизонты (RAT) урбостратоземов сложены привезёнными темногомусовыми горизонтами (AU) чернозема миграционно-сегрегационного, что определяет специфику профильной организации антропогенно-преобразованных почв в общем и валового состава, в частности.

Климатические условия района исследования. Федеральная территория «Сириус» расположена в зоне влажного субтропического климата (Cfa по классификации Кёппена-Гейгера). Среднегодовая температура воздуха составляет +14,2...+14,5 °C, среднегодовая сумма осадков –1500–1700 мм, при максимуме в зимний период. Коэффициент увлажнения по Иванову превышает 1,5, что обеспечивает промывной водный режим почв на хорошо дренированных поверхностях [5]. Геологическое строение территории определяется аллювиально-морскими отложениями дельты реки Мзымта мощностью до 70–80 метров, представленными суглинками, песчано-галечниковыми наносами и лагунными илами.

Метод исследования. Анализ валового содержания макроэлементов выполнен методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с использованием портативного рентгенофлуоресцентного анализатора «МеталлТест». Образцы почв высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали в агатовой ступке до размерности менее 0,25 мм, прессовали в таблетки. Время экспозиции составляло 90 секунд при тройном повторе для каждой пробы. Определялись содержания SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O [12].

Геохимические индексы выветривания и педогенеза. Для интерпретации полученных данных применены следующие интегральные коэффициенты, рассчитанные в молярных пропорциях оксидов. Индекс химического изменения CIA определяли по формуле (1), индекс силикатов Харрассовица K_i — по формуле (2), а индекс глинизации K_g — по формуле (3).

– CIA (Chemical Index of Alteration, индекс химического изменения по Несбитту–Янгу [13]):

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100, \quad (1)$$

где CaO^* — содержание CaO в силикатной фракции с поправкой на карбонатную и фосфатную составляющие. Свежим неизменённым породам соответствуют значения 45–55, среднеизменённым — 60–75, сильно выветрелым — 85–100 [14];

– K_i (индекс силикатов Харрассовица), K_g (индекс глинизации):

$$K_i = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3, \quad (2)$$

$$K_g = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3). \quad (3)$$

Сиаллитным почвам соответствуют значения K_i в интервале 2–4, ферраллитным — менее 2 [15, 16].

Статистическая обработка. Статистическую обработку результатов выполняли в программе Statistica 13.0 с применением *t*-критерия Стьюдента для нормально распределённых выборок и *U*-критерия Манна–Уитни – для распределений, отклоняющихся от нормальных. Различия признавали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования. Установлено, что в рекультивационно-гумусовом горизонте RAT содержание SiO_2 статистически достоверно ниже по сравнению с генетически однородным горизонтом AU чернозёма миграционно-сегрегационного, при одновременном повышении содержаний Al_2O_3 и Fe_2O_3 (табл. 1). Выявленные различия носят характер устойчивого тренда, что отражает относительное обогащение минеральной массы полуторными оксидами в условиях декарбонатизации, выноса оснований и усиления химического выветривания при промывном водном режиме субтропического климата [17].

Таблица 1

Валовой химический состав генетических горизонтов антропогенно-преобразованных почв ФТ «Сириус» и референсного чернозёма миграционно-сегрегационного (медиана и межквартильный размах, % на прокалённую навеску)

Горизонт	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O
RAT	58,33 (55,70–63,22)	18,74 (14,82–19,78)	6,11 (5,62–6,45)	2,72 (1,76–3,68)	2,27 (1,98–2,48)	2,31 (2,16–2,45)
AU	66,03 (62,99–69,76)	12,78 (11,80–13,21)	4,96 (4,83–5,25)	1,69 (1,50–1,87)	1,44 (1,32–1,70)	2,19 (2,10–2,24)
Cca	55,94 (54,73–56,36)	11,41 (10,79–11,63)	4,27 (4,14–4,48)	9,49 (8,22–10,68)	2,01 (1,84–2,39)	1,85 (1,77–1,93)

Содержание CaO и MgO в горизонте RAT демонстрирует тенденцию к более высоким валовым значениям по сравнению с AU, однако статистически значимых различий между ними не выявлено. Повышенные концентрации этих оксидов могут быть обусловлены мозаичностью антропогенно-преобразованного субстрата и участием в его составе труднорастворимых силикатных и карбонатных фаз, что нарушает прямую связь между валовым содержанием щёлочноземельных элементов и их подвижными формами. Содержание K_2O в RAT и AU также не имеет статистически значимых различий, что указывает на устойчивость калиевой составляющей к ранним стадиям трансформации в условиях урбопедогенеза.

Сравнение горизонта RAT с эталонной материнской породой Cca выявило статистически достоверные различия по большинству макроэлементов и по всем интегральным геохимическим коэффициентам. Значения индекса CIA в RAT систематически превышают значения в Cca, что отражает направленный сдвиг геохимического функционирования профиля в сторону усиления гипергенных процессов. Соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (K_i) сохраняет значения, типичные для сиааллитных почв (3,5–4,5), что указывает на отсутствие выраженной ферраллитизации за период функционирования 10–12 лет, но фиксирует начальную стадию формирования специфической геохимической обстановки.

При сравнении горизонтов RAT и AU значимые различия установлены только по SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , тогда как по CaO , MgO и K_2O они отсутствуют. Это свидетельствует о сохранении литогенной основы привезённого материала при одновременной перестройке геохимического функционирования профиля, выражающейся прежде всего в относительном перераспределении инертных полуторных оксидов и подвижного кремнезёма.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют интерпретировать наблюдаемую картину как раннюю стадию субтропического гипергенеза, наложенного на чернозёмный материал. Главным фактором, обеспечивающим направленность трансформации, выступает несоответствие между геохимическим обликом исходного субстрата и климатическими условиями его нынешнего функционирования [17]. Чернозёмы миграционно-сегрегационные сформированы в условиях семигумидного климата степной зоны Юга России с непромывным водным режимом, что определяет накопление карбонатов в средней и нижней частях профиля и поддержание щелочного баланса в верхних горизонтах. При перемещении такого материала в условия влажных субтропиков с коэффициентом увлажнения свыше 1,5 указанный геохимический баланс становится неустойчивым: запускаются процессы декарбонатизации, выноса оснований и относительного накопления полуторных оксидов.

Отсутствие значимых различий между горизонтами RAT и AU по содержанию CaO , MgO и K_2O на первый взгляд противоречит модели декарбонатизации, однако объясняется устойчивостью карбонатно-щёлочного резерва, унаследованного от исходного чернозёма. По литературным данным, в почвах гумидных регионов граница декарбонатизации продвигается со скоростью 0,5–2 см/год [18]. За 10–12 лет функционирования это соответствует продвижению на 5–24 см вглубь профиля. Учитывая, что мощность горизонта RAT обычно составляет

25–40 см, граница декарбонатизации успела затронуть лишь его верхнюю часть, тогда как средневзвешенное содержание CaO по всему горизонту пока остаётся в пределах исходных значений. Дополнительным фактором, замедляющим выщелачивание, служит поступление карбонатной пыли со строительных материалов и городских поверхностей, частично компенсирующее вынос оснований [19]. Этот «карбонатный буфер» обеспечивает временную устойчивость геохимической системы, не отменяя при этом направленности самого процесса.

В то же время статистически значимые различия по SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 между RAT и AU фиксируют именно тот процесс относительного накопления полуторных оксидов, который рассматривается классической геохимией гипергенеза [13, 17] как универсальный индикатор интенсивного выветривания. По нашим данным, в течение 10–12 лет в условиях ФТ «Сириус» этот процесс уже выходит за пределы аналитической погрешности и доступен для статистической диагностики. Наблюдаемый сдвиг согласуется с механизмом «относительного накопления»: вынос подвижных кремнезёма и оснований при сохранении инертных Al и Fe приводит к перераспределению пропорций в пользу последних. Сходные тенденции, но более чётко выраженные, отмечены при изучении желтозёмов сочинского дендрария [3, 4], где соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в верхних элювиальных горизонтах опускается ниже значений, характерных для исходных пород, и приближается к значениям, типичным для каолинит-доминированных гипергенных систем.

Достоверные различия между RAT и Cca по большинству макроэлементов и всем интегральным коэффициентам подтверждают, что чернозёмный материал в составе профиля антропогенно-преобразованных почв за 10–12 лет уже значительно отделился от исходного состояния материнской породы. Рост значений CIA в RAT относительно Cca на 5–10 единиц соответствует переходу от неизменённого к умеренно изменённому состоянию по шкале Несбитта–Янга [13]. При этом значения K_i остаются в сипаллитном диапазоне, что свидетельствует о начальной, а не завершённой стадии трансформации, и согласуется с короткими сроками формирования антропогенно-преобразованных почв.

Особый интерес представляет сопоставление направленности трансформации почв ФТ «Сириус» с данными по другим городам Черноморского побережья. По данным Захарихиной с соавторами [4], в естественных кислых желтоземах городских ландшафтов Сочи под воздействием городской пыли и строительных материалов происходит «подщелачивание» — рост pH от 5,8 до 7,5 и насыщенности основаниями с 72,9 до 97,7 % в верхнем горизонте, то есть антипедогенная инверсия в сторону чернозёмного облика. В нашем случае процесс направлен в противоположную сторону: привезённый щелочной чернозём в условиях промывного режима сдвигается в сторону подкисления и выноса оснований. Эти встречные тренды отражают универсальный механизм конвергенции свойств городских почв, описанный Херрманном с соавторами [20], при котором городской урбопедогенез независимо от исходного субстрата приводит к усреднённому набору свойств, определяемому преимущественно градостроительной обстановкой.

Сравнение с данными по Ростовской агломерации [9, 11], где аналогичные конструкторы и реплантозёмы функционируют в условиях семиаридного климата с коэффициентом увлажнения 0,7–0,9, показывает существенно более медленную геохимическую трансформацию: статистически значимые различия по полуторным оксидам там фиксируются преимущественно в почвах с возрастом более 30 лет. Таким образом, в условиях ФТ «Сириус» темпы трансформации привезённого чернозёмного материала в 2–3 раза выше, чем в зоне его естественного распространения, что обусловлено в первую очередь климатическим фактором. Это обстоятельство имеет важное практическое значение для разработки регламентов рекультивации: использование чернозёмного материала в качестве плодородного слоя в субтропической зоне требует более частого мониторинга и, возможно, корректирующих агрохимических мероприятий (известкование, поддержание органогенного слоя), направленных на стабилизацию геохимического функционирования профиля.

Проведённое исследование валового химического состава антропогенно-преобразованных почв федеральной территории «Сириус» позволило получить количественную геохимическую характеристику начальной стадии трансформации привезённого чернозёмного материала в условиях влажного субтропического климата.

Установлено, что в рекультивационно-гумусовом горизонте RAT содержание SiO_2 статистически достоверно ниже, а содержания Al_2O_3 и Fe_2O_3 — выше, чем в исходном тёмногумусовом горизонте AU чернозёма миграционно-сегрегационного. Различия по CaO , MgO и K_2O между RAT и AU не достигают статистической значимости, что объясняется устойчивостью карбонатно-щёлочного резерва чернозёмного материала и медленным продвижением границы декарбонатизации вглубь профиля.

Сравнение горизонта RAT с эталонной материнской породой Cca показало достоверные различия по большинству макроэлементов и по всем интегральным геохимическим коэффициентам, что подтверждает существенную трансформацию чернозёмного материала за 10–12 лет функционирования. Рост индекса CIA на 5–10 единиц

при сохранении сиаллитного характера соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ свидетельствует о начальной стадии субтропического гипергенеза, проявляющейся в декарбонатизации, выносе оснований и относительном накоплении полуторных оксидов.

Темпы геохимической трансформации привезённого чернозёма в условиях ФТ «Сириус» оцениваются как в 2–3 раза превышающие аналогичные показатели в зоне естественного распространения чернозёмов (Ростовская агломерация), что обусловлено более жёстким воздействием влажного субтропического климата. Полученные результаты обосновывают необходимость развития системы регулярного геохимического мониторинга городских почв ФТ «Сириус», корректировки регламентов рекультивации и разработки специализированных агрохимических подходов к поддержанию плодородия в условиях, отличных от условий формирования исходного чернозёмного материала.

Список литературы/References

1. Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Стома Г.В. Исследование почв на урбанизированных территориях: анализ методических аспектов и подходов (на примере г. Москвы). *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2021;(4):4–12.
2. Goncharova OYu, Semenyuk OV, Stoma GV. Study of soils in urbanized territories: analysis of methodological aspects and approaches (on the example of Moscow). *Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2021;(4):4–12. (In Russ.)
3. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И. Городские почвы: диагностика и классификационное определение по материалам научной экскурсии конференции SUITMA-9 по Москве. *Почвоведение*. 2018;(9):1057–1070. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18090095>
4. Prokofyeva TV, Gerasimova MI. Urban Soils: Diagnostics and Taxonomic Position according to Materials of Scientific Excursion in Moscow at the Suitma-9 Workshop. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(9):995–1007. <https://doi.org/10.1134/S1064229318090090>
5. Чижикина Н.П., Гуров И.А. Минералогический состав элювиально-глеевых желтозёмов (на примере почв дендрария г. Сочи). *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2011;(69):60–76. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-69-60-76>
6. Chizhikova NP, Gurov IA. Mineralogical Composition of Eluvial-gleyzheltozems (on the Example of Soils of the Sochi Arboretum). *Bulletin of the VV Dokuchaev Soil Institute*. 2011;(69):60–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-69-60-76>
7. Zakharikhina LV, Malyukova LS, Ryndin AV. Genesis and Geochemistry of the Soils of Urban Landscapes of the Black Sea Coast of Russia. *CATENA*. 2022;210:105881. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105881>
8. Gerasimova MI, Gurov IA. Micromorphology of Zheltozems on Hard Sedimentary Rocks and Products of Their Decomposition: Pedogenic and Lithogenic Features (With the Sochi Arboretum as an Example). *Eurasian Soil Science*. 2012;45(1):22–32. <https://doi.org/10.1134/S106422931201005X>
9. Vasenev V, Kuzyakov Y. Urban Soils as hot Spots of Anthropogenic Carbon Accumulation: Review of Stocks, Mechanisms and Driving Factors. *Land Degradation & Development*. 2018;29(6):1607–1622. <https://doi.org/10.1002/ldr.2944>
10. Ivashchenko K, Lepore E, Vasenev V, Ananyeva N, Demina S, Khabibullina F et al. Assessing Soil-Like Materials for Ecosystem Services Provided by Constructed Technosols. *Land*. 2021;10(11):1185. <https://doi.org/10.3390/land10111185>
11. Tagiverdiev SS, Gorbov SN, Bezuglova OS, Skripnikov PN. The Content and Distribution of Various Forms of Carbon in Urban Soils of Southern Russia on the Example of Rostov Agglomeration. *Geoderma Regional*. 2020;21:00266. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00266>
12. Skripnikov PN, Gorbov SN, Tagiverdiev SS, Salnik NV, Kozyrev DA, Terekhov IV et al. Carbon Accumulation Features in Different Functional Zones of Cities in the Steppe Zone. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196(7):601. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12773-1>
13. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов-на-Дону. «Эверест», 2009: 208.
14. Minkina TM, Motuzova GV, Nazarenko OG. Composition of Heavy Metal Compounds in Soils. Rostov-on-Don. Everest, 2009: 208. (In Russ.)
15. Salnik NV, Gorbov SN, Tagiverdiev SS, Skripnikov PN, Bezuglova OS. On basic elementary soil-forming processes in urban soils of Rostov. *Forest Science Issues*. 2024;7(1):140. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202471-140>
16. Ravansari R, Wilson SC, Tighe M. Portable X-ray Fluorescence for Environmental Assessment of Soils: Not Just a Point and Shoot Method. *Environment International*. 2020;134:105250. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105250>

13. Nesbitt HW, Young GM. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred From Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*. 1982;299:715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
14. Harnois L. The CIW index: A new Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*. 1988;55(3–4):319–322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
15. Fedo CM, Nesbitt HW, Young GM. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, With Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*. 1995;23(10):921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2)
16. Price JR., Velbel MA. Chemical Weathering Indices Applied to Weathering Profiles Developed on Heterogeneous Felsic Metamorphic Parent Rocks. *Chemical Geology*. 2003;202(3–4):397–416. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.11.001>
17. Алексеев А.О., Калинин П.И., Алексеева Т.В. Почвенные индикаторы параметров палеоэкологических условий на юге Восточно-Европейской равнины в четвертичное время. *Почвоведение*. 2019;4:389–399. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040026>
- Alekseev AO, Kalinin PI, Alekseeva TV. Soil Indicators of Paleoenvironmental Conditions in the South of the East European Plain in the Quaternary Time. *Eurasian Soil Science*. 2019;52:349–358. <https://doi.org/10.1134/S1064229319040021>
18. Глушакова А.М., Лысак Л.В., Умарова А.Б., Прокофьева Т.В., Подушин Ю.В., Быкова Г.С. и др. Бактериальные комплексы урбанозёмов некоторых южных городов России. *Почвоведение*. 2021;(2):224–231. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020052>
- Glushakova AM, Lysak LV, Umarova AB, Prokof'eva TV, Bykova GS, Podushin YV et al. Bacterial Complexes of Urbanozems in Southern Cities of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(2):257–263. <https://doi.org/10.1134/S1064229321020058>
19. Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию. *Почвоведение*. 2011;(5):611–623.
- Prokofyeva TV, Martynenko IA, Ivannikov FA. Classification of Moscow soils and parent materials and its possible inclusion in the classification system of Russian soils. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(5):561–571. <https://doi.org/10.1134/S1064229311050127>
20. Herrmann DL, Schiffman LA, Shuster WD. Urbanization Drives Convergence in Soil Profile Texture and Carbon Content. *Environmental Research Letters*. 2020;15(11):114001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbb00>

Об авторах:

Надежда Владимировна Сальник, кандидат биологических наук, научный сотрудник международного научного центра в области экологии и вопросов изменения климата Научно-технологического университета «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский проспект, 1), младший научный сотрудник Академии биологии и медицины им. Д.И. Иванковского Южного федерального университета (344090, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), salnik.nv@talantiuspeh.ru

Сергей Николаевич Горбов, доктор биологических наук, руководитель группы Международного научного центра в области экологии и вопросов изменения климата, Научно-технологического университета «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский проспект, д. 1), профессор кафедры ботаники Южного федерального университета (344090, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), gorbov.sn@talantiuspeh.ru

Даниил Игоревич Бузин, лаборант-исследователь международного научного центра в области экологии и вопросов изменения климата Научно-технологического университета «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский проспект, д. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), buzin.di@talantiuspeh.ru

Илья Павлович Лобзенко, младший научный сотрудник международного научного центра в области экологии и вопросов изменения климата Научно-технологического университета «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский проспект, д. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), lobzenko.ip@talantiuspeh.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.В. Сальник: концептуализация, методология, проведение исследования, формальный анализ, визуализация, первоначальный вариант рукописи.

С.Н. Горбов: концептуализация, методология, научное руководство, рецензирование и редактирование рукописи.

Д.И. Бужин: проведение исследования.

И.П. Лобзенко: проведение исследования, формальный анализ.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nadezhda V. Salnik, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, International Scientific Center for Ecology and Climate Change, Sirius University of Science and Technology (1 Olimpiyskiy Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Krai, 354340, Russian Federation); Junior Researcher, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, Southern Federal University (194/1 Stachki Ave., Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), salnik.nv@talantiuspeh.ru

Sergey N. Gorbov, Dr. Sci. (Biol.), Head of the Research Group, International Scientific Center for Ecology and Climate Change, Sirius University of Science and Technology (1 Olimpiyskiy Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Krai, 354340, Russian Federation); Professor, Department of Botany, Southern Federal University (194/1 Stachki Ave., Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), gorbov.sn@talantiuspeh.ru

Daniil I. Buzin, Research Laboratory Assistant, International Scientific Center for Ecology and Climate Change, Sirius University of Science and Technology (1 Olimpiyskiy Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Krai, 354340, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), buzin.di@talantiuspeh.ru

Ilya P. Lobzenko, Junior Researcher, International Scientific Center for Ecology and Climate Change, Sirius University of Science and Technology (1 Olimpiyskiy Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Krai, 354340, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), lobzenko.ip@talantiuspeh.ru

Author Contributions:

NV Salnik: conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, visualization, writing – original draft.

SN Gorbov: conceptualization, methodology, supervision, writing – review & editing.

DI Buzin: investigation.

IP Lobzenko: investigation, formal analysis.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 19.05.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 05.06.2026

Принята к публикации/Accepted 28.06.2026

ПОЧВОВЕДЕНИЕ SOIL SCIENCE



УДК 579.222.3

Оригинальное эмпирическое исследование

Изменение культивируемости почвенных бактерий при внесении ростовых факторов

Ф.Ю. Токарева , А.В. Горовцов 

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ mbflavia1999@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время культивированию в лабораторных условиях поддается около 1 % всех существующих бактерий. Отсутствие возможности получения чистых культур многих микроорганизмов создает серьезные трудности в фундаментальных и прикладных исследованиях. Особенно данная необходимость касается почвенных бактерий, в связи с богатым видовым разнообразием прокариот в данной природной среде. Вследствие данных фактов остро стоит вопрос поиска способов культивирования новых штаммов, в том числе разработка новых питательных сред и модификация существующих путем внесения ростовых факторов. Целью настоящей работы является изучение возможности повышения культивируемости бактерий путем внесения в среду R2A таких ростовых факторов, как гем и гуamat калия, а также замены агар-агара на желлановую камедь.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись почвы антропогенных ландшафтов Ростовской области. Было исследовано влияние ростовых факторов на культивируемость почвенных бактерий, путем подсчета общего числа колоний на универсальной питательной среде, а также отдельного учета быстрорастущих и медленнорастущих штаммов. Обработка полученных данных проводилась в программе Statistica Star Soft.

Результаты исследования. Согласно полученным результатам, гуamat калия оказывает стимулирующее действие в низких концентрациях и ингибирующее в высоких. Гем увеличивает скорость быстрорастущих штаммов, однако одновременно с этим происходит подавление медленнорастущих бактерий. Желлановая камедь показала улучшение культивируемости медленнорастущих штаммов в одном из вариантов.

Обсуждение и заключение. В связи с неоднозначностью результатов исследования действия желлановой камеди и гема необходимы дальнейшие эксперименты с данными компонентами. В то же время, гуamat калия оказал стимулирующее действие на рост бактерий. В связи с полученными данными можно сделать вывод, согласно которому при внесении ростовых факторов станет возможно культивировать ранее некультивируемые почвенные бактерии. Таким образом, данная тема является перспективным направлением в экспериментальной микробиологии и требует дальнейших схожих исследований.

Ключевые слова: некультивируемые микроорганизмы, ростовые факторы, почвенные бактерии, агар R2A, гуamat калия, гем, желлановая камедь

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Токарева Ф.Ю., Горовцов А.В. Изменение культивируемости почвенных бактерий при внесении ростовых факторов. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):33–41.

Changing the Cultivability of Soil Bacteria with the Addition of Growth Factors

Flaviya Yu. Tokareva , Andrey V. Gorovtsov 

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ mbflavia1999@mail.ru

Abstract

Introduction. Currently, approximately 1% of all known bacteria can be cultivated under laboratory conditions. The inability to obtain pure cultures of many microorganisms creates significant challenges for fundamental and applied research. This is particularly true for soil bacteria because of the high diversity of prokaryotic species in this environment. These findings highlight the need to develop methods for cultivating new strains, including the development of new culture media and modification of existing media by adding growth factors. The aim of this study is to investigate the possibility of increasing bacterial cultivability by adding growth factors such as heme and potassium humate to the R2A medium, as well as replacing agar-agar with gellan gum.

Materials and Methods. The study involved soils from anthropogenic landscapes in the Rostov Region. The effects of growth factors on the cultivability of soil bacteria were investigated by counting the total number of colonies on a universal culture medium and separately recording fast-growing and slow-growing strains. The data obtained were processed using Statistica.

Research Results. According to the results, potassium humate has a stimulating effect at low concentrations and an inhibitory effect at high concentrations. Heme increases the growth rate of fast-growing strains while simultaneously inhibiting slow-growing bacteria. Gellan gum improved the cultivability of slow-growing strains in one experimental variant.

Discussion and Conclusion. Given the ambiguous results regarding the effects of gellan gum and heme, further experiments with these components are needed. However, potassium humate stimulated bacterial growth. Based on these data, it can be concluded that the addition of growth factors may enable the cultivation of previously uncultivated soil bacteria. Thus, this topic is a promising area in experimental microbiology and requires further similar research.

Keywords: uncultivated microorganisms, growth factors, soil bacteria, R2A agar, potassium humate, heme, gellan gum

Acknowledgments. The authors thank the editorial board and the reviewers for their careful consideration of the manuscript and for their comments, which helped improve its quality.

For citation. Tokareva FYu, Gorovtsov AV. Changing the Cultivability of Soil Bacteria with the Addition of Growth Factors. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):33–41.

Введение. В настоящий момент большинство микроорганизмов известно лишь по данным метагеномного анализа, благодаря которому было открыто большое количество неизвестных ранее групп бактерий. Метагеномика — раздел молекулярной генетики, изучающий генетический материал, полученный из образцов окружающей среды. Благодаря метагеномному анализу было выявлено значительное количество неизвестных ранее групп микроорганизмов на уровне филумов [1]. Для получения культур некультивируемых ранее микроорганизмов необходимо разрабатывать новые способы культивирования. На культивируемость микроорганизмов влияет множество факторов, таких как температура, влажность, pH, количество кислорода, состав питательных субстратов и так далее. Большинство микроорганизмов, особенно грамотрицательных, прекращают процессы, связанные с ростом и размножением из-за различных факторов окружающей среды. Такие микроорганизмы получили название некультивируемых форм [2]. Иногда в стрессовых ситуациях микроорганизмы переходят в некультивируемое состояние. Данный факт может представлять серьезную угрозу безопасности пищевых продуктов и здоровью населения, так как, несмотря на некультивируемость, клетки остаются жизнеспособными и могут размножаться [3]. В существующих на данный момент питательных средах может наблюдаться нехватка некоторых питательных веществ или быть соотношения, мешающие росту некоторых бактерий. Таким образом, при неблагоприятных условиях среды микроорганизм может переходить в некультивируемое состояние. Также при избытке питательных веществ наблюдается ускоренный рост быстрорастущих штаммов, которые перерабатывают и загрязняют метаболитами субстрат, что может ингибировать рост медленно растущих бактерий. Данные факты создают двоякую ситуацию: с одной стороны, питательных веществ в субстрате может не хватать, с другой — быть избыточное количество. Именно по данной причине в качестве базового субстрата была выбрана среда R2A — олиготрофная среда, предназначенная для культивирования многих групп микроорганизмов. В связи с олиготрофностью проще изучать действие ростовых факторов, поскольку среда не вызывает разрастания быстрорастущих групп бактерий.

На субстратах, содержащих большое количество питательных веществ, может происходить ингибирование медленнорастущих видов более быстрорастущими. Данное явление происходит вследствие того, что быстрорастущие бактерии перерабатывают большую часть питательного субстрата, а также вследствие чувства кворума. В ином случае, высокая концентрация питательных веществ в составе среды способна оказывать токсическое действие на олиготрофные группы бактерий.

Выбор таких ростовых факторов, как гуamat калия, гем обусловлен рядом причин. Гуминовые кислоты являются неотъемлемой частью большинства почв. В связи с тем, что в почве наблюдается наибольшее видовое разнообразие микроорганизмов, имеется предположение, согласно которому именно гуминовые вещества являются основным питательным компонентом для почвенной микробиоты. Гуamat калия также является одним из наиболее распространенных удобрений для растений. Вследствие данных фактов была выдвинута гипотеза о возможном стимулирующем действии названного вещества на бактерии. Отмечено, что гуматы в рекомендованных для промышленного применения концентрациях ингибируют рост *Pseudomonas* spp. и *Bacillus subtilis*. В то же время, при понижении концентрации ингибирование прекращалось [4].

Другой причиной, по которой гуamat был выбран в качестве ростового фактора, является способность данного соединения повышать высеваемость аминотрофов и олиготрофных групп микроорганизмов. Данный эффект может быть обусловлен тем, что эта группа микроорганизмов способна утилизировать многие низкомолекулярные органические вещества, образующиеся в ходе деятельности других групп микроорганизмов. На численность азотфиксирующих бактерий и актиномицетов обработка гуматами не оказала статистически значимого влияния [5].

Гуминовые вещества могут оказывать влияние не только на бактерии, но и на дрожжи *Trichosporon moniliforme*. Отмечается, что использование гуминовых веществ торфа дает большее время генерации и наибольший прирост биомассы [6]. В другой статье сказано об обнаружении генов деградации гуминовых кислот у штамма *Pseudomonas* sp., полученного из почв субарктической тундры [7].

Выбор гема для настоящего исследования обусловлен тем, что некоторые микроорганизмы обладают способностью перерабатывать прокариотический гем в эукариотический. Особенно данная способность характерна для патогенных микроорганизмов. Следовательно, при использовании гема в качестве добавки к питательным средам, гем может выступать в качестве компонента дыхательной цепи, что может усиливать метаболизм и ускорять рост бактерий на чашках Петри, а также способствовать появлению колоний труднокультивируемых и медленнорастущих штаммов. Имеется гипотеза, согласно которой гем может оказать стимулирующее действие на почвенные микроорганизмы, так как, согласно 10 литературным источникам, *Escherichia coli* способна поглощать гемин из окружающей среды при внесении данной добавки в питательную среду [8]. Также имеются данные, согласно которым гем применяется для восстановления угнетенных и поврежденных культур.

Помимо внесения ростовых факторов повысить высеваемость может замена агар-агара на альтернативные железирующие агенты, а именно- на желлановую камедь. Было установлено, что применение желлановой камеди при культивировании морских бактерий влияет на разнообразие культивируемых видов, способствуя росту видов, не поддающихся культивированию на субстратах на основе агара [9]. Высокая термостабильность желлановой камеди делает ее идеальной средой для роста нескольких термофилов, таких как 9 термофильные *Bacillus* sp., *Methanobacterium* sp. и *Methanobrevibacter* sp., а также бактерий, принадлежащих к роду *Thermotogales* [10].

Исходя из проанализированных литературных данных была выдвинута гипотеза о способности вышеописанных компонентов повышать высеваемость почвенных бактерий на среде R2A и поставлена цель протестировать влияние гумата калия, гема и желлановой камеди на общее число колоний почвенных бактерий. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: отобрать образцы почв с антропогенных ландшафтов г. Ростова-на-Дону, произвести посев на среду R2A с разными железирующими агентами и ростовыми факторами, учесть результаты посевов и статистически обработать полученные данные.

Материалы и методы. Объект исследования в настоящей работе — микробиом почв Ботанического сада Южного федерального университета, урбопочвы г. Ростова-на-Дону, почва с сельскохозяйственных полей окрестностей г. Ростова-на-Дону. Все исследованные почвы являются черноземом обыкновенным.

Отбор почвенных образцов проводился на пробных площадках методом конверта. Часть исследуемой территории характеризовалась однородным рельефом, однородной структурой почвы и растительным покровом. Одна пробная площадка размером 25 м закладывалась на площади 100 м². Далее на пробной площадке отбирались точечные пробы- материал, отобранный из одного слоя почвенного профиля, типичный для данного горизонта. Отбор точечных проб проводился из одного или нескольких слоев методом конверта: выкапывали шурф 0,3 м на 0,3 м, глубиной 0,2 м, поверхность стенок шурфа очищалась стерильным ножом. Далее из стенки вырезался почвенный образец, размер которого был обусловлен заданной навеской. 200 г почвы = 20 см × 3 см × 3 см; 500 г = 20 см × 5 см × 3 см. Далее составляли объединенную пробу путем смешивания нескольких точечных проб, которые были отобраны на одной площадке.

Для исследования влияния уплотнителей и добавочных компонентов в качестве базовой среды применялась среда R2A, разбавленная в 100 раз. Агар R2A — олиготрофная среда для учета микроорганизмов в условиях более длительной инкубации, по сравнению с другими средами общего назначения. Низкая концентрация пептона, глюкозы и дрожжевого экстракта препятствует подавлению медленно растущих групп бактерий быстро-растущими. В представленном исследовании был сделан выбор в пользу разбавленной олиготрофной среды с целью отслеживания улучшения культивируемости почвенных бактерий при внесении разнообразных добавок.

Экстракция гема из человеческой крови осуществлялась по следующей методике:

- 1) отделение эритроцитарной массы путем центрифугирования при 10000 оборотах в течение 20 минут;
- 2) гемолиз эритроцитов в дистиллированной воде;
- 3) отделение гема в подкисленном ацетоне: раствор гемолизированных эритроцитов смешивали с ацетоном в соотношении 1:4. Добавляли небольшое количество аскорбиновой кислоты. При дальнейшем центрифугировании происходило осаждение глобинов и выход гема в супернатант;
- 4) испарение ацетона на часовых стеклах;
- 5) отделение сухого осадка от часовых стекол и хранение в герметичной таре. В базовый субстрат были добавлены такие концентрации гема, как 25 мг/л и 75 мг/л.

Из литературных источников была получена информация, согласно которой гуamat калия может оказывать разнообразный эффект в зависимости от концентрации. Исходя из данного факта было принято решение провести серию экспериментов с высокими и низкими концентрациями исследуемого ростового фактора. 0,01 %; 0,02 %; 0,05 %; 0,1 %; 0,001 %; 0,0002 %; 0,001 %.

Учет колоний методом подсчета проводился на третьи, седьмые и десятые сутки. Это связано с тем, что различные группы бактерий имеют не одинаковую скорость роста, а ростовые факторы и желирующие агенты могут изменять не только количественный, но и качественный состав высеваемых микроорганизмов.

В программе Statistica 12 (StatSoft, США) был произведен дисперсионный анализ имеющихся данных, построены графики для оценки полученных результатов.

Результаты исследования. Результаты учета роста бактерий на желлановой камеди оказались неоднозначными. Исследование проводилось в разные сезоны- в марте, конце июня и середине октября. Был проведен отдельный учет общего числа колоний, а также колоний, выросших с 1 по 3 сутки (быстрорастущие) и с 3 по 10 сутки (медленнорастущие). Результаты учета общего числа колоний представлены на рис. 1.

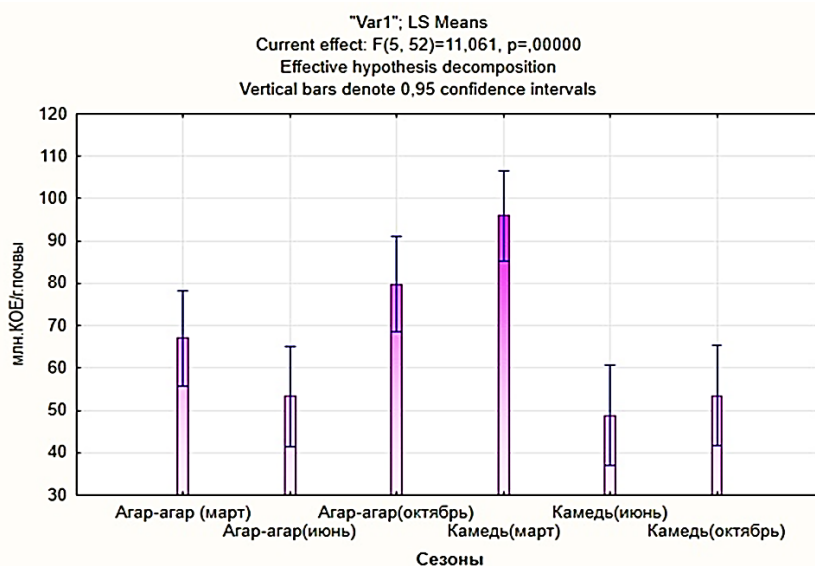


Рис. 1. Влияние желирующего агента на общее число колоний в разные сезоны

Согласно графику, результаты различались в зависимости от сезона. В марте наибольшее число колоний наблюдалось на среде с желлановой камедью, в октябре же микроорганизмы лучше росли на среде с агар-агаром, в июле не наблюдается статистически значимой разницы между разными желирующими агентами. Далее был проведен учет быстрорастущих штаммов (рис. 2).

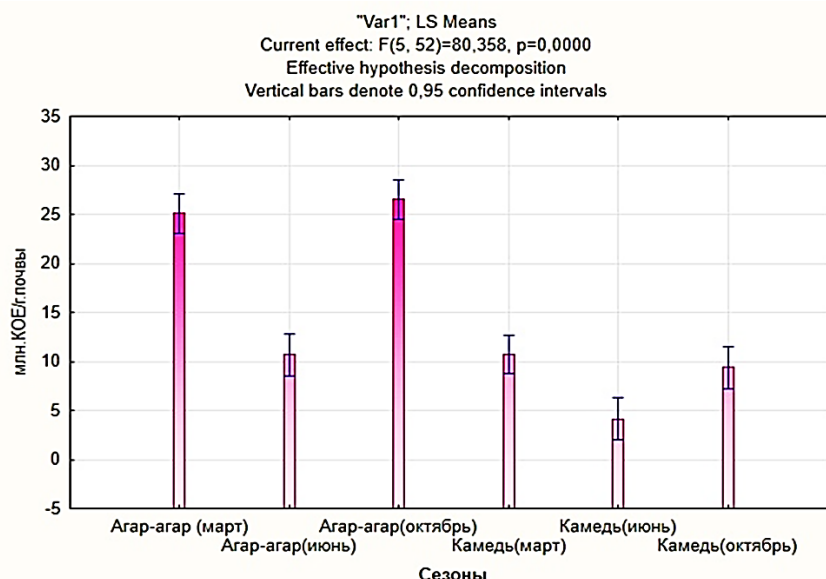


Рис. 2. Влияние желирующего агента на рост быстрорастущих штаммов в разные сезоны

Наибольший рост колоний наблюдался в октябре и марте. В июне почвы сильно дегидратированы, следовательно, численность колоний снижается. Предположительно, быстрорастущие штаммы являются зимогенными — требующими высоких концентраций питательного субстрата. В период активного естественного увлажнения наблюдается наибольшее поступление органических веществ, в этот период зимогенные штаммы преобладают в почве при достаточном увлажнении и обилии растительных остатков. Также согласно графику, желлановая камедь оказывает угнетающее действие на быстрорастущие штаммы.

Также был проведен учет медленнорастущих штаммов (с 3 по 10 сутки). Результаты данного эксперимента представлены на графике (рис. 3).

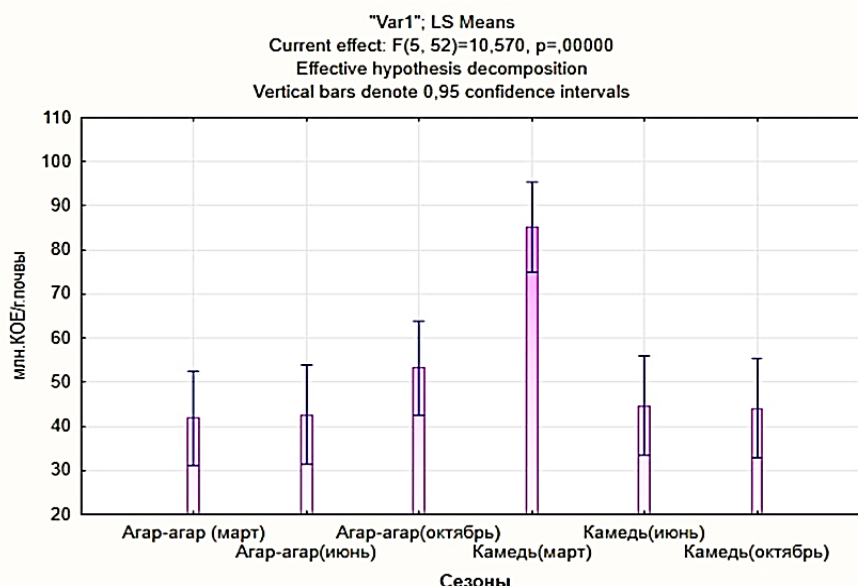


Рис. 3. Влияние желирующего агента на медленнорастущие штаммы

Как наглядно представлено на графике, желлановая камедь способствует улучшению культивируемости только в одном варианте. В остальных не наблюдается статистически значимой разницы. Исходя из полученных данных можно предположить, что медленнорастущие штаммы являются автохтонными- питающимися высоко-трансформированной почвенной органикой, вследствие чего их численность стабильнее, а сезонные колебания сглажены.

При добавлении в базовый субстрат высоких концентраций гумата калия были получены результаты, представленные на рис. 4.

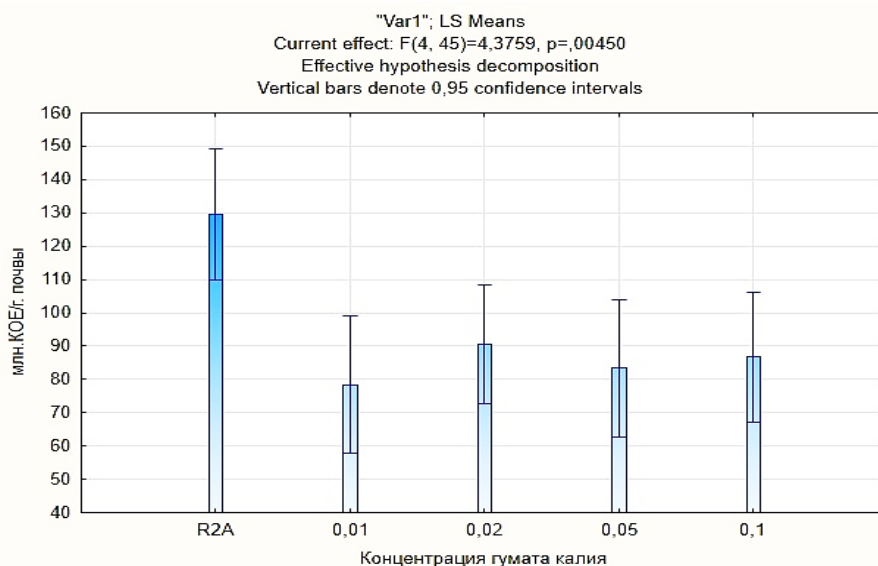


Рис. 4. Ингибирующее действие высоких концентраций гумата калия. Концентрация гумата калия выражена в г/литр

Согласно представленным на графике данным, все концентрации ингибируют рост колоний на чашках Петри. Результат подтверждает данные из литературных источников о схожем действии высоких концентраций гуматов. Вследствие присутствия повышенных концентраций питательных веществ в среде у некоторых микроорганизмов происходит разбалансировка метаболизма, что в конечном итоге может привести к гибели или снижению скорости роста.

Гумат калия показал наиболее эффективные результаты в концентрации 0,001 %, стимулируя рост как быстрорастущих, так и медленно растущих бактерий. Полученные результаты представлены на графике (рис. 5).

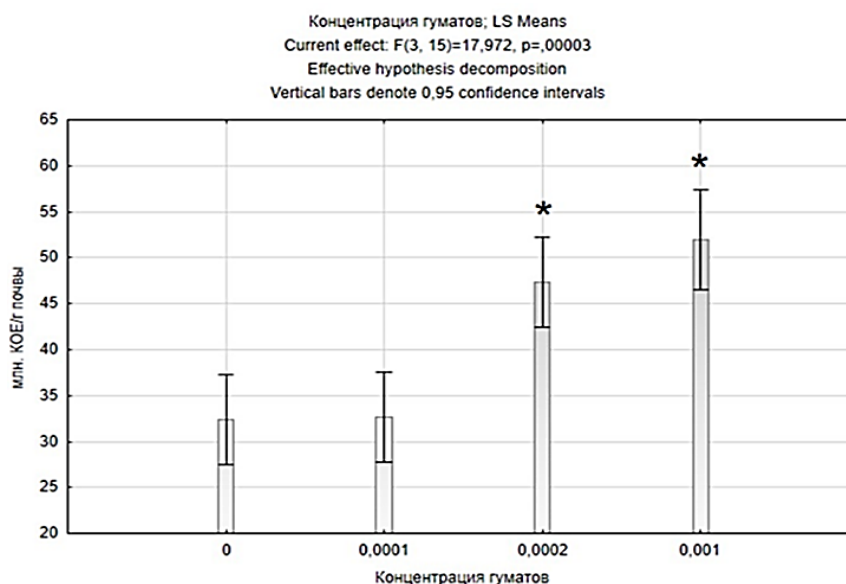


Рис. 5. Изменение численности колоний на чашках Петри при внесении гумата калия. Концентрация гумата калия выражена в г/литр

Концентрации ниже 0,001 % не оказывали значительного стимулирующего эффекта на рост почвенных бактерий.

При добавлении в агар R2A человеческого гема в концентрации 25 мг/л, 75 мг/л, были получены результаты, согласно которым гем не оказывает значительного влияния на общее число колоний, выделенных из урбопочв г. Ростова-на-Дону, однако стимулирует рост быстрорастущих штаммов, что показано на рис. 6.

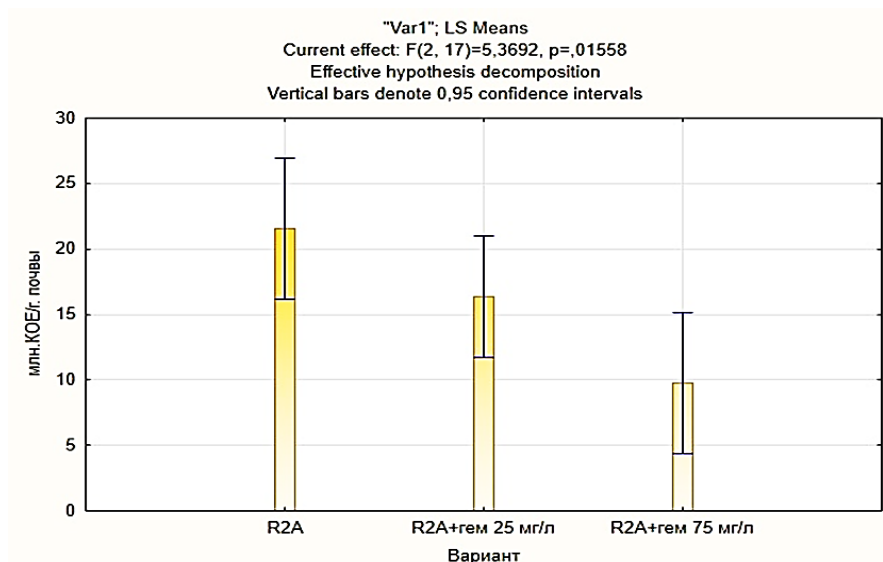


Рис. 6. Влияние гема на культивируемость бактерий урбопочв города Ростова-на-Дону, быстрорастущие штаммы

При учете медленно растущих штаммов, напротив, происходит статистически значимое снижение численности бактерий. Очевидно, быстрорастущие штаммы перерабатывают большую часть субстрата и тем самым подавляют медленно растущие.

Подобные данные были получены при исследовании влияния гема на сельскохозяйственную почву с полей окрестностей города Ростова-на-Дону. Результаты представлены на графике (рис. 7).

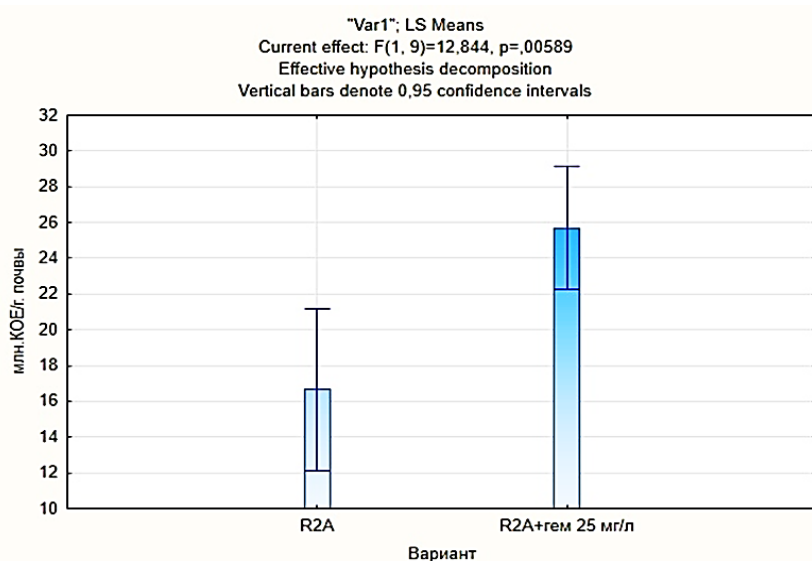


Рис. 7. Влияние гема на быстрорастущие штаммы из сельскохозяйственных почв

Аналогично урбопочвам при исследовании сельскохозяйственных почв добавление гема повышает культивируемость быстрорастущих штаммов, но в меньшей степени — 25 мг на литр. На медленно растущие штаммы из данной почвы гем не оказывает статистически значимой разницы. Данный и предыдущий эксперименты, где выявлено положительное влияние гема на скорость роста быстрорастущих штаммов, подтверждают способность ростового фактора усиливать рост некоторых бактерий.

Обсуждение и заключение. В ходе серии экспериментов было выяснено, что при применении желлановой камеди в качестве альтернативного агар-агару желирующего агента в некоторых случаях наблюдается увеличение числа колоний почвенных бактерий на чашках Петри. Медленно растущие штаммы бактерий показывают лучший рост на среде с желлановой камедью. Колонии быстрорастущих лучше высеваются на среде с агар-агаром. Однако в связи с неоднозначными результатами в некоторых экспериментах применение желлановой камеди требует дальнейших исследований с разными почвами и в разные сезоны.

Выбранные ростовые факторы действительно повышают культивируемость почвенных бактерий при добавлении в агар R2A. Гумат калия в концентрации 0,001 % статистически значимо повышает численность колоний

как быстрорастущих, так и медленно растущих бактерий, что подтверждает гипотезу о том, что гуминовые вещества оказывают стимулирующее действие на почвенную микробиоту, которая, в свою очередь, повышает количество питательных веществ в почве, что стимулирует рост растений.

Гем оказывает стимулирующее действие преимущественно на быстрорастущие штаммы микроорганизмов. При учете медленно растущих видов результаты не идентичны для двух почв: в случае почвы с сельскохозяйственных почв не наблюдается значительной разницы, в то время как при исследовании урбопочвы гем оказывает ингибирующее действие на рост колоний.

Исходя из всех результатов работы, исследованные ростовые факторы могут применяться в качестве стимуляторов культивируемости, однако требуются дальнейшие эксперименты в связи с неоднозначностью результатов для желатиновой камеди и гема.

Список литературы/References

1. Равин Н.В., Марданов А.В., Скрябин К.Г. Метагеномика как инструмент изучения «некультивируемых» микроорганизмов. *Генетика*. 2015;51(5):519. <https://doi.org/10.7868/S0016675815050069>
Ravin NV, Mardanov AV, Skryabin KG. Metagenomics as a Tool for Studying "Uncultivated" Microorganisms. *Genetics*. 2015;51(5):519. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016675815050069>
2. Веревкина М.Н. Особенности подбора питательных сред для микроорганизмов. В: Труды 19-ой международной научно-методической конференции по патологической анатомии животных «Актуальные вопросы патологии, морфологии и терапии животных», Ставрополь, 20–22 сентября 2017 года. Ставрополь: Издательство «АГРУС»; 2018. С. 400–402.
Verevkin MN. Features of the selection of nutrient media for microorganisms In: Proceedings of the 19th International Scientific and Methodological Conference on Animal Pathological Anatomy "Current Issues in Pathology, Morphology and Therapy of Animals", Stavropol, September 20–22, 2017. Stavropol: AGRUS Publishing House; 2018. P. 400–402. (In Russ.)
3. İzgördü ÖK, Darcan C, Kariptaş E. Overview of VBNC, a Survival Strategy for Microorganisms. *3 Biotech*. 2022;12(11):307. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03371-4>
4. Пищик В.Н., Бойцова Л.В., Воробьев Н.И. Влияние гуминовых веществ на растения и ризосферные микроорганизмы в растительно-микробных системах. *Агрохимия*. 2019;(3):85–95. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030116>
Pishchik VN, Boytsova LV, Vorobyov NI. The Influence of Humic Substances on Plants and Rhizosphere Microorganisms in Plant-Microbial Systems. *Agrochemistry*. 2019;(3):85–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0002188119030116>
5. Горовцов А.В., Безуглова О.С., Полиенко Е.А., Попов А.Е. Влияние гуминовых веществ на микробиологическую активность почвы под плодовыми культурами. *Живые и биокосные системы*. 2016;(18):2. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-18/article-2> (дата обращения: 14.05.2026).
Gorovtsov AV, Bezuglova OS, Polienko EA, Popov AE. The Influence of Humic Substances on the Microbiological Activity of the Soil Under Fruit Crops. *Living and Bio-Inert Systems*. 2016;(18):2. (In Russ.) URL: <https://jbks.ru/archive/issue-18/article-2> (accessed: 14.05.2026).
6. Гатаулина А.Р., Канарская З.А., Канарский А.В. Использование гуминовых веществ торфа в питательной среде для культивирования дрожжей. В: Труды XIII международной научно-практической конференции «Качество продукции, технологий и образования», Магнитогорск, 30 марта 2018 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; 2018. С. 120–124.
Gataullina AR, Kanarskaya ZA, Kanarsky AV. The use of peat humic substances in a nutrient medium for yeast cultivation In: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference "Product, Technology and Education Quality", Magnitogorsk, March 30, 2018. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2018. P. 120–124. (In Russ.)
7. Kim D., Kim D, Park HJ, Sul WJ, Park H. Transcriptome Analysis of *Pseudomonas* sp. From Subarctic Tundra Soil: Pathway Description and Gene Discovery for Humic Acids Degradation. *Folia Microbiologica*. 2018;63:315–323. <https://doi.org/10.1007/s12223-017-0573-0>
8. Fyrestam J, Östman C. Determination of Heme in Microorganisms Using HPLC MS/MS and Cobalt (III) Protoporphyrin IX Inhibition of Heme Acquisition. In 44 *Escherichia Coli*. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2017;409(30):6999–7010. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0610-5>
9. Rygaard AM, Thøgersen MS, Nielsen KF, Gram L, Bentzon-Tilia M. Effects of Gelling Agent and Extracellular Signaling Molecules on the Culturability of Marine Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 2017;83(9):e00243–17 <https://doi.org/10.1128/AEM.00243-17>
10. Liu YF, Yang L, He QP, Xu YL, Zhu YT, Mi YL. Gelling and Reducing Agents are Potential Carbon and Energy Sources in Culturing of Anaerobic Microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*. 2025;91(3):e0227624

Об авторах:

Флавия Юрьевна Токарева, магистрант кафедры биохимии и микробиологии Академии биологии и медицины Южного федерального университета (344090, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1), [ORCID](#), mbflavia1999@mail.ru

Андрей Владимирович Горовцов, кандидат биологических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой биохимии и микробиологии Академии биологии и медицины Южного федерального университета (344090, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), gorovtsov@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Ф.Ю. Токарева: проведение посевов, обработка полученных данных, написание текста статьи.

А.В. Горовцов: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Flavia Yu. Tokareva, Master's student in the Department of Biochemistry and Microbiology of the Academy of Biology and Medicine of the Southern Federal University (344090, Russian Federation, Rostov-on-Don, Stachki Ave., 194/1), [ORCID](#), mbflavia1999@mail.ru

Andrey V. Gorovtsov, PhD in Biology, Associate Professor, Acting Head of the Department of Biochemistry and Microbiology at the Academy of Biology and Medicine of the Southern Federal University (194/1 Stachki Ave., Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), gorovtsov@gmail.com

Author Contributions:

FYu Tokareva: conducting sowings, processing the obtained data, writing the text of the article.

AV Gorovtsov: scientific supervision, analysis of research results, revision of text, correction of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 16.05.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 30.05.2026

Принята к публикации/Accepted 14.06.2026

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHING



УДК 639.3.043:636.087.8

Оригинальное эмпирическое исследование

Экономическая эффективность выращивания аквакультур в установках замкнутого водоснабжения с использованием кормов на основе личинки чёрной львинки

А.А. Удалов

Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ Udalov717@yandex.ru

Аннотация

Введение. Высокая себестоимость кормов, в структуре которой доминируют рыбная мука и рыбий жир, остаётся ключевым ограничением рентабельности индустриальной аквакультуры в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ). Перспективным направлением снижения кормовых затрат и повышения экологической устойчивости отрасли выступает частичная замена рыбной муки белком насекомых — мукой из личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*). Цель работы — оценить влияние частичной замены рыбной муки мукой из личинок чёрной львинки на рыбоводно-биологические показатели гибрида осетровых и определить экономическую эффективность такого замещения в условиях УЗВ.

Материалы и методы. Лабораторный опыт длительностью 90 суток выполнен на молоди гибрида осетровых в четырёх группах при уровнях замены рыбной муки 0 (контроль), 25, 50 и 75 %. Оценивали удельную скорость роста (SGR), кормовой коэффициент (FCR), выживаемость, а также показатели экономической эффективности.

Результаты исследования. Наибольшая продуктивность достигнута при 50 % замены: конечная масса возросла на 9,8 %, кормовой коэффициент снизился с 1,35 до 1,21, выживаемость составила 95 %. Затраты корма на 1 кг прироста сократились на 13,6 %. При экстраполяции на товарный модуль мощностью 10 т/год рентабельность повышается с 45,9 до 56,1 %. Обсуждение. Полученные данные подтверждают целесообразность включения муки из *H. illucens* в рецептуры осетровых кормов на уровне до 50 % замены рыбной муки без ущерба для роста и при ощутимом экономическом эффекте.

Обсуждение и заключение. Полученные данные подтверждают наличие оптимального уровня замены рыбной муки белком чёрной львинки: положительный эффект до уровня 50 % обусловлен благоприятным аминокислотным профилем, антимикробным действием лауриновой кислоты и иммуномодулирующими свойствами хитина, тогда как при 75 % замены показатели опускаются ниже контрольных значений. Экономический эффект формируется одновременно по двум каналам — за счёт улучшения кормового коэффициента и удешевления рецептуры, что делает технологию устойчивой к ценовой волатильности рыбной муки. Интеграция производства личинки чёрной львинки на органических отходах в единый ресурсный контур с УЗВ соответствует принципам циркулярной биоэкономики и задачам импортозамещения кормовых компонентов в АПК. Таким образом, замена 50 % рыбной муки мукой из личинок чёрной львинки в кормах для гибрида осетровых в УЗВ повышает рентабельность товарного модуля мощностью 10 т/год с 45,9 до 56,1 % и может быть рекомендована как ресурсосберегающее решение для индустриальной аквакультуры; превышение порога включения (75 %) нецелесообразно.

Ключевые слова: экономическая эффективность, биоэкономика, аквакультура, установки замкнутого водоснабжения (УЗВ), гибрид осетровых, чёрная львинка, мука из насекомых, кормовой белок

Для цитирования. Удалов А.А. Экономическая эффективность выращивания аквакультур в установках замкнутого водоснабжения с использованием кормов на основе личинки чёрной львинки. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):42–48.

Economic Efficiency of Aquaculture Production in Recirculating Aquaculture Systems Using Feeds Based on Black Soldier Fly Larvae

Andrey A. Udalov 

Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ Udalov717@yandex.ru

Abstract

Introduction. The high cost of feed, dominated by fish meal and fish oil, remains a key limitation on the profitability of industrial aquaculture in closed-loop water supply (CLWS) installations. A promising approach to reducing feed costs and increasing the environmental sustainability of the industry is the partial replacement of fish meal with insect protein derived from black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). The purpose of the study is to assess the impact of partial replacement of fish meal with black soldier fly larva meal on the biological performance of sturgeon hybrids and to determine the economic efficiency of this replacement under CLWS conditions.

Materials and Methods. A laboratory experiment lasting 90 days was performed on juvenile sturgeon hybrids in four groups at fish meal replacement levels of 0 (control), 25, 50 and 75%. Specific growth rate (SGR), feed conversion ratio (FCR), survival rate, and economic efficiency indicators were evaluated.

Research Results. The highest productivity was achieved with 50% replacement: final weight increased by 9.8%, the feed conversion ratio decreased from 1.35 to 1.21, and the survival rate was 95%. Feed costs per 1 kg of growth decreased by 13.6%. When extrapolated to a production module with a capacity of 10 t/year, profitability increases from 45.9% to 56.1%. Discussion. The data obtained confirm the feasibility of replacing up to 50% of fish meal with *H. illucens* meal in sturgeon feed formulations without compromising growth and with a tangible economic benefit.

Discussion and Conclusion. The data obtained confirm the existence of an optimal level of fish meal replacement with black soldier fly protein: the positive effect observed at replacement levels of up to 50% is attributable to a favorable amino acid profile, the antimicrobial effect of lauric acid and the immunomodulatory properties of chitin, while at 75% replacement the indicators fall below the control values. The economic effect arises through two mechanisms – through improved feed conversion and reduced feed formulation costs, which makes the technology less sensitive to fluctuations in fish meal prices. Integration black soldier fly larva production using organic waste into a closed resource cycle with CLWS is consistent with the principles of the circular bioeconomy and supports the substitution of imported feed components in the agro-industrial complex. Thus, replacing 50% of fish meal with black soldier fly larva meal in sturgeon hybrids feed under CLWS conditions increases the profitability of the production module with a capacity of 10 tons/year from 45.9 to 56.1% and can be recommended as a resource-saving solution for industrial aquaculture; exceeding the inclusion threshold (75%) is impractical.

Keywords: economic efficiency, bioeconomics, aquaculture, closed-loop water supply systems, sturgeon hybrids, black soldier fly, insect meal, feed protein

For citation. Udalov AA. Economic Efficiency of Aquaculture Cultivation in Recirculating Aquaculture Systems using Feeds based on Black Soldier Fly Larvae. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):42–48.

Введение. Аграрный сектор представляет собой значимую сферу народного хозяйства и играет важную роль в экономике нашей страны. Развитие агропромышленного комплекса по-прежнему остается одним из стратегических приоритетов экономической и социальной политики Российской Федерации [1].

Длительное время сельское хозяйство не было бизнесом, привлекательным для инвесторов, в связи с длинным производственным циклом, подверженным природным рискам и большим потерям урожая при выращивании, сборе и хранении, невозможностью автоматизации биологических процессов и отсутствием прогресса в повышении производительности и инноваций [2].

Индустриальная аквакультура в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) рассматривается сегодня как одно из наиболее ресурсоэффективных направлений товарного рыбоводства. Замкнутый контур позволяет вести круглогодичное выращивание с высокой плотностью посадки, минимизировать водопотребление и потери питательных веществ, а также обеспечивать строгий контроль параметров среды. Вместе с тем экономика УЗВ остаётся напряжённой: высокая капиталоемкость инфраструктуры сочетается с дорогим кормлением, на долю которого приходится от 50 % до 70 % операционных затрат.

В научных исследованиях под аквакультурой понимается быстро развивающаяся отрасль промышленности, которая играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности стран. Однако рост этой индустрии

сопровождается рядом проблем, таких как увеличенная нагрузка на выращиваемые организмы и окружающую среду [3].

Проблема обеспечения продовольственной безопасности страны не столько аграрная, сколько комплексная, связанная с макроэкономическим развитием государства, его возможностями по осуществлению социально ориентированной политики и повышению жизненного уровня населения [4].

Согласно рекомендациям ООН по устойчивому развитию, аквакультура направлена на производство достаточного количества продуктов питания надлежащего качества для борьбы с недоеданием и голодом во всем мире [5].

В настоящее время ведется поиск новых подходов к содержанию сельскохозяйственных животных и объектов аквакультуры в условиях воздействия факторов окружающей среды, основанных на использовании биологически активных добавок [6].

Ключевым удорожающим компонентом комбикормов для хищных и всеядных гидробионтов, к числу которых относятся осетровые, традиционно выступают рыбная мука и рыбий жир. Их стоимость подвержена значительной волатильности, поскольку определяется объемами промысла дикой рыбы, квотами и климатическими факторами. Зависимость отрасли от ограниченного и дорожающего источника белка формирует прямой экономический и экологический запрос на поиск альтернативных кормовых ингредиентов.

В качестве субстрата для выращивания пробиотических бацилл может быть использовано сырье животного происхождения. Одним из таких видов сырья может служить личинка мухи Черная львинка (*Hermetia illucens*), которая является альтернативным источником белка и жира в производстве комбикормов [7].

В этом контексте мука из личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*) рассматривается как один из наиболее перспективных альтернативных источников животного белка. Личинки содержат 40–45 % сырого протеина со сбалансированным аминокислотным профилем, а также лауриновую кислоту, обладающую антимикробным действием, и хитин, проявляющий пребиотические и иммуностимулирующие свойства. Принципиальное преимущество чёрной львинки состоит в способности к биоконверсии органических отходов в высокоценную белковую биомассу, что встраивает её производство в логику циркулярной биоэкономики и замкнутого ресурсного контура.

Процесс смешивания является одним из важнейших этапов в технологии производства комбикормов. Равномерное распределение компонентов обеспечивает поступление всех питательных (белки, жиры, углеводы) и биологически активных веществ (пробиотики, ферменты, пептиды, постбиотики и прочее) в организм животного [8].

Сочетание установки замкнутого водоснабжения (УЗВ) и кормов на основе насекомых обладает выраженным синергетическим потенциалом. С одной стороны, замкнутая система задаёт контролируемые условия для корректной оценки кормовой эффективности нового ингредиента. С другой — частичная замена рыбной муки белком львинки служит действенным рычагом снижения кормовых затрат и, соответственно, себестоимости товарной продукции. Для отечественного агропромышленного комплекса данное направление дополнительно значимо в свете задач продовольственной безопасности и импортозамещения кормовых компонентов.

Несмотря на растущий интерес к теме, экономическое обоснование применения муки из *H. illucens* в кормлении осетровых в условиях УЗВ остаётся недостаточно проработанным: большинство исследований сосредоточено на физиологических и ростовых эффектах, тогда как технико-экономическая оценка представлена фрагментарно.

Гипотеза исследования состоит в том, что существует оптимальный уровень замены рыбной муки мукой из личинок чёрной львинки, при котором рыбоводно-биологические показатели гибрида осетровых не снижаются относительно контроля, а экономическая эффективность выращивания в УЗВ возрастает за счёт уменьшения кормовых затрат.

Цель работы — оценить влияние частичной замены рыбной муки мукой из личинок чёрной львинки на продуктивность гибрида осетровых и определить экономическую эффективность такого замещения в условиях УЗВ. Для достижения цели решались задачи: сформировать опытные рецептуры с различной долей замены; оценить рост, кормовой коэффициент и выживаемость рыбы; рассчитать показатели экономической эффективности и определить оптимальный уровень замещения.

Материалы и методы. Лабораторный эксперимент выполнен на базе установки замкнутого водоснабжения в течение 90 суток. Объектом исследования служила молодь гибрида осетровых со средней начальной массой 50 г. Рыбу распределяли в четыре группы по 30 особей в каждой; параметры среды (температура 20–22°C, содержание растворённого кислорода не ниже 7 мг/л, pH 7,2–7,6) поддерживали идентичными для всех групп.

Опытные рецептуры формировали на основе осетрового комбикорма (RusModus Feed) путём частичной замены рыбной муки мукой из личинок чёрной львинки: контрольная группа — 0 % замены, опытные — 25, 50 и 75 %. Кормление осуществляли вручную до видимого насыщения; учитывали ежесуточную выдачу корма и отход рыбы.

Рыбоводно-биологическую эффективность оценивали по следующим показателям.

Удельная скорость роста (SGR, %/сут):

$$SGR = (\ln W_k - \ln W_n) / t \times 100, \quad (1)$$

где W_k и W_n — конечная и начальная масса, г; t — длительность опыта, сут.

Кормовой коэффициент (FCR):

$$FCR = M_k / \Delta B, \quad (2)$$

где M_k — масса израсходованного корма, кг; ΔB — абсолютный прирост ихтиомассы, кг.

Выживаемость (S, %):

$$S = N_k / N_n \times 100 \quad (3)$$

Экономическую эффективность оценивали по системе показателей.

Кормовые затраты на 1 кг прироста ($З_k$, руб./кг):

$$З_k = FCR \times Ц_k, \quad (4)$$

где $Ц_k$ — цена корма, руб./кг (RusModus Feed — 220 руб./кг; цена опытных рецептов скорректирована на долю муки ЛЛ).

Полная себестоимость и рентабельность (R, %):

$$R = (B - C) / C \times 100, \quad (5)$$

где B — выручка, руб.; C — полная себестоимость (корм, эксплуатация УЗВ, оплата труда с отчислениями, амортизация), руб. Цена реализации товарной продукции принята 900 руб/кг.

Для оценки эффекта в производственных условиях измеренные коэффициенты (FCR, выживаемость, цена корма) экстраполированы на товарный модуль УЗВ проектной мощностью 10 т товарной рыбы в год.

Результаты исследования. Рыбоводно-биологические показатели по итогам 90-суточного опыта приведены в таблице 1.

Таблица 1

Рыбоводно-биологические показатели гибрида осетровых при разных уровнях замены рыбной муки мукой ЛЛ

Показатель	Контроль 0 %	ЛЛ-25 25 %	ЛЛ-50 50 %	ЛЛ-75 75 %
Начальная масса, г	50	50	50	50
Конечная масса, г	215	228	236	209
Абсолютный прирост, г	165	178	186	159
SGR, %/сут	1,62	1,69	1,72	1,59
Кормовой коэффициент FCR	1,35	1,28	1,21	1,41
Выживаемость, %	92	94	95	90

Замена рыбной муки мукой из *H. illucens* до уровня 50 % сопровождалась улучшением всех ростовых показателей: конечная масса рыбы увеличилась на 9,8 % относительно контроля, удельная скорость роста возросла с 1,62 до 1,72 %/сут, кормовой коэффициент снизился с 1,35 до 1,21, а выживаемость достигла максимума (95 %). Дальнейшее повышение доли замены до 75 % приводило к ухудшению показателей ниже уровня контроля, что указывает на превышение физиологически допустимого порога включения и определяет 50 % как оптимальный уровень замещения.

Результаты оценки кормовой составляющей экономической эффективности представлены в таблице 2.

Таблица 2

Кормовые затраты на единицу прироста ихтиомассы

Показатель	Контроль 0 %	ЛЛ-25 25 %	ЛЛ-50 50 %	ЛЛ-75 75 %
Цена корма, руб./кг	220	216	212	208
Кормовой коэффициент FCR	1,35	1,28	1,21	1,41
Затраты корма на 1 кг прироста, руб.	297,0	276,5	256,5	293,3
Экономия к контролю, руб./кг	—	20,5	40,5	3,7
Экономия к контролю, %	—	6,9	13,6	1,3

Снижение кормового коэффициента в сочетании с умеренным удешевлением рецептуры за счёт частичной замены рыбной муки обеспечивает сокращение кормовых затрат на единицу прироста. Максимальный эффект

достигается в группе ЛЛ-50: затраты корма на 1 кг прироста уменьшаются на 40,5 руб./кг, или на 13,6 % относительно контроля. В группе ЛЛ-75 экономический выигрыш практически нивелируется ростом FCR, что согласуется с ухудшением рыбоводных показателей.

Для оценки эффекта в производственном масштабе измеренные коэффициенты оптимальной группы (ЛЛ-50) и контроля экстраполированы на товарный модуль УЗВ мощностью 10 т/год (таблица 3).

Таблица 3

Экономические показатели товарного модуля УЗВ (10 т/год)

Показатель	Контроль (0 %)	ЛЛ-50 (50 %)
Расход корма, т/год	13,5	12,1
Затраты на корм, руб./год	2 970 000	2 565 200
Себестоимость, руб./кг	617,0	576,5
Выручка, руб./год	9 000 000	9 000 000
Прибыль, руб./год	2 830 000	3 234 800
Рентабельность, %	45,9	56,1

Переход на рецептуру с 50 % замены рыбной муки мукой ЛЛ обеспечивает экономию кормовых затрат 404,8 тыс. руб./год на модуль мощностью 10 т, снижает себестоимость продукции на 40,5 руб./кг и повышает рентабельность производства с 45,9 до 56,1 %. Таким образом, экономический эффект достигается одновременно по двум каналам — за счёт улучшения конверсии корма и удешевления рецептуры.

В целом, экономический анализ предоставляет возможность глубоко понять финансовые потоки, выявить наиболее рентабельные направления деятельности и оценить экономическую эффективность различных стратегий. Например, в условиях растущего внимания к экологической устойчивости, компании АПК могут инвестировать в экологически чистые продукты и повышать свою конкурентоспособность и устойчивость [9].

Обсуждение и заключение. Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о наличии оптимального уровня замены рыбной муки белком чёрной львинки. Улучшение ростовых показателей при умеренном включении муки *H. illucens* может быть связано с благоприятным аминокислотным профилем, антимикробным действием лауриновой кислоты и иммуномодулирующим эффектом хитина, тогда как снижение продуктивности при высокой доле замены объясняется избыточным поступлением хитина и дисбалансом отдельных аминокислот.

С экономической точки зрения важно, что положительный эффект формируется не только за счёт удешевления рецептуры, но и за счёт улучшения кормового коэффициента, который оказывает мультипликативное влияние на себестоимость. Это делает технологию устойчивой к колебаниям цен на муку из насекомых. Интеграция производства личинки чёрной львинки на органических отходах в единый ресурсный контур с УЗВ способна дополнительно усилить экономический и экологический эффект в логике циркулярной биоэкономики.

Таким образом, в результате исследования были получены следующие выводы:

1. Оптимальным уровнем замены рыбной муки мукой из личинок чёрной львинки в кормлении гибрида осетровых в УЗВ является 50 %: при нём достигаются максимальные конечная масса (236 г), удельная скорость роста (1,72 %/сут) и выживаемость (95 %) при минимальном кормовом коэффициенте (1,21).
2. Замещение на уровне 50 % снижает кормовые затраты на единицу прироста на 13,6 % и обеспечивает на товарном модуле УЗВ мощностью 10 т/год экономию 404,8 тыс. руб., снижение себестоимости на 40,5 руб./кг и рост рентабельности с 45,9 до 56,1 %.
3. Превышение порога включения (75 % замены) нецелесообразно: рыбоводные и экономические показатели опускаются ниже контрольного уровня.

Список литературы/References

1. Удалов А.А., Удалова З.В. Цифровая трансформация и ее влияние на экономический анализ в сельском хозяйстве. В: *Сборнике материалов международного круглого стола «Аграрная экономика: новые решения в новой реальности»*, Ростов-на-Дону, 12 апреля 2024 года. АзовПринт: Ростов-на-Дону; 2024. С. 87–91.
- Udalov AA, Udalova ZV. Digital Transformation and Its Impact on Economic Analysis in Agriculture. In: *Collection of materials from the international round table "Agrarian Economy: New Solutions in a New Reality"*, Rostov-on-Don, April 12, 2024. Rostov-on-Don: AzovPrint LLC; 2024. P. 87–91. (In Russ.)
2. Удалов А.А., Удалова З.В. Внедрение и развитие цифровых технологий в АПК. В: *Труды VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и практики: Гатчинские чтения–2019»*,

Гатчина, 17–18 мая 2019 года. Т. 1. Государственный институт экономики, финансов, права и технологий: Гатчина; 2019. С. 562–566.

Udalov AA, Udalova ZV. Introduction and Development of Digital Technologies in the Agro-Industrial Complex. In: *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference "Actual problems of science and Practice: Gatchina Readings–2019", Gatchina, May 17-18, 2019.* Vol. 1. Gatchina: State Institute of Economics, Finance, Law, and Technology; 2019. P. 562–566. (In Russ.)

3. Пономарева Е.Н., Сорокина М.Н., Григорьев В.А., Мазанко М.С., Рудой Д.В. Сравнительная оценка молодки карпа, выращенной с применением пробиотических препаратов на основе различных штаммов *Bacillus*. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2025;(2):83–96. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-2-83-96>

Ponomareva EN, Sorokina MN, Grigoriev VA, Mazanko MS, Rudoy DV. Comparative Evaluation of Juvenile Carp Grown Using Probiotic Preparations Based on Various *Bacillus* Strains. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*. 2025;(2):83–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-2-83-96>

4. Удалов А.А. Развитие сельского хозяйства в условиях антиросийских санкций В кн.: *Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса*. Монография. Окорков В.В. (ред.). Иваново: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр»; 2019. С. 327–331.

Udalov AA. Development of Agriculture in the Context of Anti-Russian Sanctions. In: *Modern Trends in Scientific Support for the Agro-Industrial Complex. Monograph*. Okorkov VV. (ed.). Ivanovo: Federal State Budgetary Scientific Institution "Upper Volga Federal Agrarian Research Center"; 2019. P. 327–331. (In Russ.)

5. Chistyakov VA, Chikindas ML, Todorov SD, Bren AB, Allilueva EV, Rudoy DV. Aquaculture as Source of Sustainable Proteins. *Food Science and Applied Biotechnology*. 2025;8(1):123. <https://doi.org/10.30721/fsab2025.v8.i1.461>

6. Rudoy DV, Ponomareva EN, Mangasaryan DS, Maltseva TA. Immunomodulatory Feed Additives for Farm Animals and Fish. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2025;17(6–2):652–668. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-2-1590>

7. Рудой Д.В., Мальцева Т.А., Мазанко М.С., Брень А.Б., Татарова А.А. Исследование возможности использования жмыха личинки как субстрата для выращивания пробиотиков и использования их в комбикормах. В: *Труды XVI Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса» в рамках XXVI Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаши» и «Агротехнологии», Ростов-на-Дону, 01–03 марта 2023 года*. Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ; 2023. С. 118–121. <https://doi.org/10.23947/interagro.2023.118-121>

Rudoy D.V., Maltseva T.A., Mazanko M.S., Bren A.B., Tatarova A.A. Research on the Possibility of Using Larva Cake as a Substrate for Growing Probiotics and Using Them in Compound Feed. In: *Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of the Agro-Industrial Complex" as part of the XXVI Agro-Industrial Forum of the South of Russia and the Interagromash and Agrotechnologies exhibitions, Rostov-on-Don, March 1–3, 2023.* Rostov-on-Don: DSTU-PRINT LLC; 2023. P. 118–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/interagro.2023.118-121>

8. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Мальцева Т.А., Чигвинцев В.В., Рыбак А.Т., Старостин Д.В. и др. Особенности процесса смешивания комбикормов с использованием высокоценных кормовых добавок. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2025;211(07):587–596. <http://doi.org/10.21515/1990-4665-211-047>

Pakhomov VI, Rudoy DV, Maltseva TA, Chigvintsev VV, Rybak AT, Starostin DV, et al. Features of the Process of Compound Feed Mixing Using High-Value Feed Additives. *Politematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2025;211(07):587–596. (In Russ.) <http://doi.org/10.21515/1990-4665-211-047>

9. Удалова З.В. Роль экономического анализа в разработке стратегий устойчивого развития АПК. В: *Проблемы учета, анализа, аудита и статистики в условиях рынка: Ученые записки*. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный экономический университет (РИНХ); 2024. С. 229–237.

Udalova ZV. The Role of Economic Analysis in the Development of Sustainable Agricultural Development Strategies. In: *Problems of Accounting, Analysis, Audit, and Statistics in Market Conditions: Scientific Notes*. Rostov-on-Don: Rostov State University of Economics; 2024. P. 229–237

Об авторе:

Андрей Андреевич Удалов, кандидат экономических наук, доцент, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ) (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 69), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), Udalov717@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Andrey A. Udalov, Cand.Sc (Economics), Associate Professor, Rostov State University of Economics (69 Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), Udalov717@yandex.ru

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 03.06.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 20.06.2026

Принята к публикации/Accepted 01.07.2026

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

FOOD SYSTEMS



УДК 681.51:66.047

Оригинальное эмпирическое исследование

Экспериментальное исследование параметров тонкослойной дегидратации яблочных чипсов

М.К. Тимошенко¹ , Нгуен Суан Тьем² ¹ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону Российская Федерация² Вьетнамский технический университет им. Ле Куй Дона, г. Ханой, Вьетнам✉ miroslav.timoshenko@gmail.com

Аннотация

Введение. Сохранение урожая в настоящее время является ключевым направлением сельского хозяйства. Согласно докладу об индексе пищевых отходов ЮНЕП (UNEP Food Waste Index Report) ежегодно в мире выбрасывается около 1,05 млрд тонн еды на этапе потребления. Еще около 14% продуктов теряется на этапе сбора урожая и транспортировки. Хранение скоропортящейся продукции требует больших энергозатрат, а многие продукты не поддаются заморозке. Дегидратация снижает влажность, замедляя порчу, уменьшает вес и объем продукции, но сама является энергоёмким процессом. Цель исследования — разработать энергоэффективную технологию сушки бытовым дегидратором, сохраняющую пищевые и органолептические свойства продукта, и создать соответствующий прототип дегидратора на основе анализа кинетики сушки и сенсорной оценки продукции.

Материалы и методы. Модернизированный бытовой дегидратор позволяет не только задавать усреднённые параметры сушки, но и контролировать остаточную влажность продукта. Система включает: корпус с поддонами, нагревателем (до 250 Вт) и вентилятором (20–30 Вт); датчики температуры (DS18B20) и влажности (BME 280); микроконтроллер ESP 32 с WiFi и Bluetooth; дисплей ICST7789VW, сенсорные кнопки TTP223; симисторные реле Omron G3MB 202P для управления нагревателем и вентилятором. Модули по шине I2C объединены на одной шине с корректировкой адресов датчиков; датчик DS18B20 подключён по 1 Wire (с обязательной подтяжкой линии к питанию). В силовой цепи применены предохранители: 0,15 А для вентилятора, 1,5 А — для нагревателя (с 50 % запасом перегрузки), что защищает от короткого замыкания и не превышает предельный ток реле (2 А).

Результаты исследования. В ходе эксперимента провели тонкослойную сушку яблок: диски толщиной 7 мм (точность 0,1 мм) разместили на решётках дегидратора. Начальная масса — 577,2 г, после сушки — 89,4 г (потеря массы — 487,8 г), толщина дисков снизилась до 2 мм. Энергию измеряли ваттметром (1845 Вт·ч) и косвенно — по мощности нагревателя (210 Вт) и срабатыванию реле; энергия на сушку — 1700 Вт·ч. Телеметрию с датчиков передавали в Telegram бот (в формате JSON), затем экспортировали в текстовый файл и обрабатывали в Python и Matlab. Результаты представлены на графиках (влажность, влагопотеря, удельная влажность, эффективность).

Обсуждение и заключение. Тестирование прототипа дегидратора позволило оценить параметры сушки яблочных чипсов. Применялся комплексный подход: контролировались характеристики сырья, энергозатраты и параметры процесса с помощью телеметрической системы. Система передавала данные в Telegram бот, затем их обрабатывали в JSON, экспортировали в таблицу и анализировали в Matlab. Графики динамики влагопотери и других показателей помогли оценить энергоэффективность установки. Анализ удельной эффективности позволяет оптимизировать режим сушки. Исследование подтвердило работоспособность прототипа и эффективность методики. Разработанная система сбора данных пригодна для тестирования аналогичных установок, а полученные показатели — для сравнения методов дегидратации и расчётов технико-экономических параметров.

Ключевые слова: дегидратация, энергоэффективность, хранение урожая, влажность, телеметрия, энергозатраты, органолептические свойства

Для цитирования. Тимошенко М.К., Нгуен Суан Тьем. Экспериментальное исследование параметров тонкослойной дегидратации яблочных чипсов. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):49–57.

Experimental Investigation of Thin-Layer Dehydration Characteristics of Apple Chips

Miroslav K. Timoshenko¹  , Nguyen Xuan Thiem² 

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

 miroslav.timoshenko@gmail.com

Abstract

Introduction. Post-harvest preservation is currently a critical issue in agriculture. According to the UNEP Food Waste Index Report, approximately 1.05 billion tonnes of food are wasted annually at the consumption stage globally. Furthermore, approximately 14% of food products are lost during harvesting and transportation. The storage of perishable commodities is highly energy-intensive, and numerous food products are unsuitable for freezing. Dehydration effectively reduces moisture content, thereby inhibiting spoilage and reducing product weight and volume; however, the dehydration process itself is inherently energy-consuming. The objective of this study is to develop an energy-efficient drying technology using a domestic dehydrator that preserves the nutritional and organoleptic properties of the product, and to design a corresponding dehydrator prototype based on drying kinetics analysis and sensory evaluation.

Materials and Methods. The upgraded domestic dehydrator enables both the setting of averaged drying parameters and the monitoring of the residual moisture content of the product. The system architecture comprises a chassis with trays, a heating element (up to 250 W), and a fan (20–30 W); temperature (DS18B20) and humidity (BME280) sensors; an ESP32 microcontroller with Wi-Fi and Bluetooth connectivity; an ST7789VW display, and TTP223 capacitive touch buttons; and Omron G3MB-202P triac relays for heater and fan control. The modules are integrated via a common I2C bus with adjustable sensor addressing; the DS18B20 sensor is interfaced using the 1-Wire protocol with a mandatory pull-up resistor on the data line. Fuses are integrated into the power circuit: 0.15 A for the fan and 1.5 A for the heating element (incorporating a 50% overload margin), which ensures short-circuit protection and does not exceed the maximum rated current of the relays (2 A).

Research Results. During the experimental procedure, thin-layer drying of apples was performed: apple discs with a thickness of 7 mm (accuracy of ± 0.1 mm) were arranged on the dehydrator trays. The initial mass was 577.2 g, decreasing to 89.4 g post-drying (mass loss of 487.8 g), while the disc thickness was reduced to 2 mm. Energy consumption was monitored using a wattmeter (1845 Wh) and evaluated indirectly based on the heater power (210 W) and the relay duty cycle; the net energy consumed for drying was 1700 Wh. Telemetry data from the sensors were transmitted to a Telegram bot in JSON format, subsequently exported to a text file, and processed utilizing Python and MATLAB. The findings are presented graphically, illustrating moisture content, moisture loss rate, specific humidity, and process efficiency.

Discussion and Conclusion. Testing of the prototype dehydrator enabled the evaluation of the drying parameters for apple chips. A comprehensive approach was employed, whereby raw material characteristics, energy consumption, and process parameters were continuously monitored using a telemetry system. The system transmitted data to a Telegram bot in JSON format, which was subsequently exported to a tabular format and analyzed utilizing MATLAB. Graphs illustrating moisture loss dynamics and other key indicators facilitated an assessment of the system's energy efficiency. Analysis of the specific efficiency allows optimization of the drying regime. The study confirmed the operability of the prototype and the efficacy of the developed methodology. The proposed data acquisition system is suitable for testing similar installations, while the obtained performance indicators can be utilized for benchmarking dehydration methods and calculating technical and economic parameters.

Keywords: dehydration, energy efficiency, post-harvest preservation, moisture content, telemetry, energy consumption, organoleptic properties

For citation. Timoshenko MK, Nguyen Xuan Thiem. Experimental Investigation of Thin-Layer Dehydration Characteristics of Apple Chips. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):49–57.

Введение. Сохранение урожая — одно из ключевых направлений современного сельского хозяйства, значимость которого в нынешних условиях трудно переоценить. В ситуации нарастающей экономической и политической нестабильности в мире всё больше экспертов обращают внимание на угрозу продовольственного кризиса. Прогнозы аналитиков указывают на реальную опасность масштабного голода: по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), ещё в 2010 году от недоедания страдали около 925 миллионов

человек — порядка 16 % населения планеты¹. Сегодня в 29 странах сохраняется острая нехватка продовольствия, а последствия дефицита питания трагичны: ежегодно от голода и недоедания умирает 2,2 миллиона детей.

Парадоксальность ситуации заключается в том, что на фоне столь серьёзной проблемы в экономически развитых регионах наблюдается значительная расточительность в обращении с продуктами: ежедневно в мире утилизируется свыше 2,5 миллионов тонн продовольствия, так и не попавшего к потребителю. В этих условиях критически важными становятся осознанное потребление, грамотное распределение ресурсов и максимально эффективное сохранение получаемого урожая.

Особую сложность представляет хранение скоропортящейся продукции — овощей, фруктов, ягод, трав: чтобы сберечь не только товарный вид, но и питательную ценность таких продуктов, требуются существенные энергозатраты на поддержание особых климатических и температурных условий. Для ряда культур допустимо хранение в холодильных камерах при температуре от -2 до 0 °C и влажности 85–95 %, однако многие продукты (например, бананы, сезонные ягоды, лекарственные травы) не поддаются длительному хранению и не подходят для заморозки.

В такой ситуации одним из наиболее действенных способов сохранения продукции становится дегидратация (сушка). Этот метод позволяет существенно снизить содержание воды в продукте, тем самым ограничивая микробиологические и ферментативные процессы, приводящие к порче. Сушка минимизирует биохимическую, химическую и микробиологическую деградацию, заметно уменьшает вес и объём продукции, а значит, сокращает расходы на упаковку, транспортировку и хранение, позволяя держать продукты при температуре окружающей среды.

Вместе с тем сушка — энергоёмкий процесс, поэтому актуальной задачей становится разработка и внедрение более эффективных технологий, позволяющих сократить энергозатраты [1, 3]. При этом важно учитывать специфику биопродуктов: высокое начальное содержание влаги, чувствительность к температурному воздействию (что влияет на цвет, вкус, текстуру и пищевую ценность), а также такие технологические сложности, как усадка и агломерация продукта в ходе сушки. Кинетика сушки помогает установить взаимосвязь между изменением влажности материала и параметрами процесса, свойствами сырья и рядом других факторов [2].

Разработка алгоритмов и прототипов интеллектуальных сушильных установок имеет большое значение для агропромышленного комплекса [4]. Цель исследования — определить условия, при которых сушка будет не только энергоэффективной, но и максимально сохранит пищевые и органолептические характеристики конечного продукта, а также создать прототип дегидрататора, удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям. Достичь этого можно посредством комплексного анализа кинетики сушки, динамики изменения состава питательных веществ и результатов сенсорной оценки сушёной продукции.

Материалы и методы. Перспективным направлением развития дегидрататоров является оснащение их датчиками влажности и температуры, позволяющими оценить величину остаточной влажности высушиваемого продукта. Современные датчики целесообразно подключать к микроконтроллерам, что позволяет создать локальную систему микропроцессорного управления дегидрататором, существенно повысив его функциональность [5]. В итоге проведенной модернизации получим перспективный бытовой дегидрататор, позволяющий не только осуществлять сушку, задавая усредненные значения температуры и времени сушки, но и контролировать процесс сушки, оценивая остаточную влажность продукта в дегидрататоре [6, 7]. Такая система должна содержать следующие компоненты:

- корпус дегидрататора, с размещенными в нем поддонами, нагревателем и вентилятором;
- нагреватель с системой, позволяющей регулировать его мощность (в качестве такой системы для бытового дегидрататора может выступать симисторное реле);
- вентилятор с регулируемой скоростью вращения. Скорость вращения также может управляться симисторным реле (в случае использования асинхронного двигателя), либо транзисторным драйвером в случае использования двигателя постоянного тока.
- датчик температуры, контролирующий температуру воздуха на выходе нагревателя;
- блок датчиков температуры и влажности, контролирующий влажность воздуха на выходе дегидрататора;
- интерфейсные модули (дисплей, кнопки), используемые для задания параметров сушки;
- микроконтроллерный блок управления на современном микроконтроллере, имеющем модули WiFi и Bluetooth для управления системой и обеспечения удобного беспроводного интерфейса.

В качестве объекта управления выбираем бытовой дегидрататор башенного типа. Дегидрататор снабжен нагревателем мощностью до 250 Вт и вентилятором мощностью 20–30 Вт. В качестве управляющего микроконтроллера системы управления выбираем плату на микроконтроллере ESP-32. Для измерения температуры и влажности выбираем интегральные датчики модели BME-280 с подключением по шине I²C; для контроля температуры

¹ <https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/122049/>

нагревателя используем цифровой термометр модели DS18B20 с подключением по шине 1-Wire. Для управления процессом сушки выбираем сенсорные кнопки на кон троллере TTP223. В индикации режимов работы используем монохромный графический дисплей типа ICST7789VW 0.96 с разрешением 80×160 точек и интерфейсом I²C. Для управления нагревателем и вентилятором используем два симисторных реле типа Omron типа G3MB-202P.

Структура модели дегидрататора показана на рис. 1, структурная схема системы управления — на рис. 2

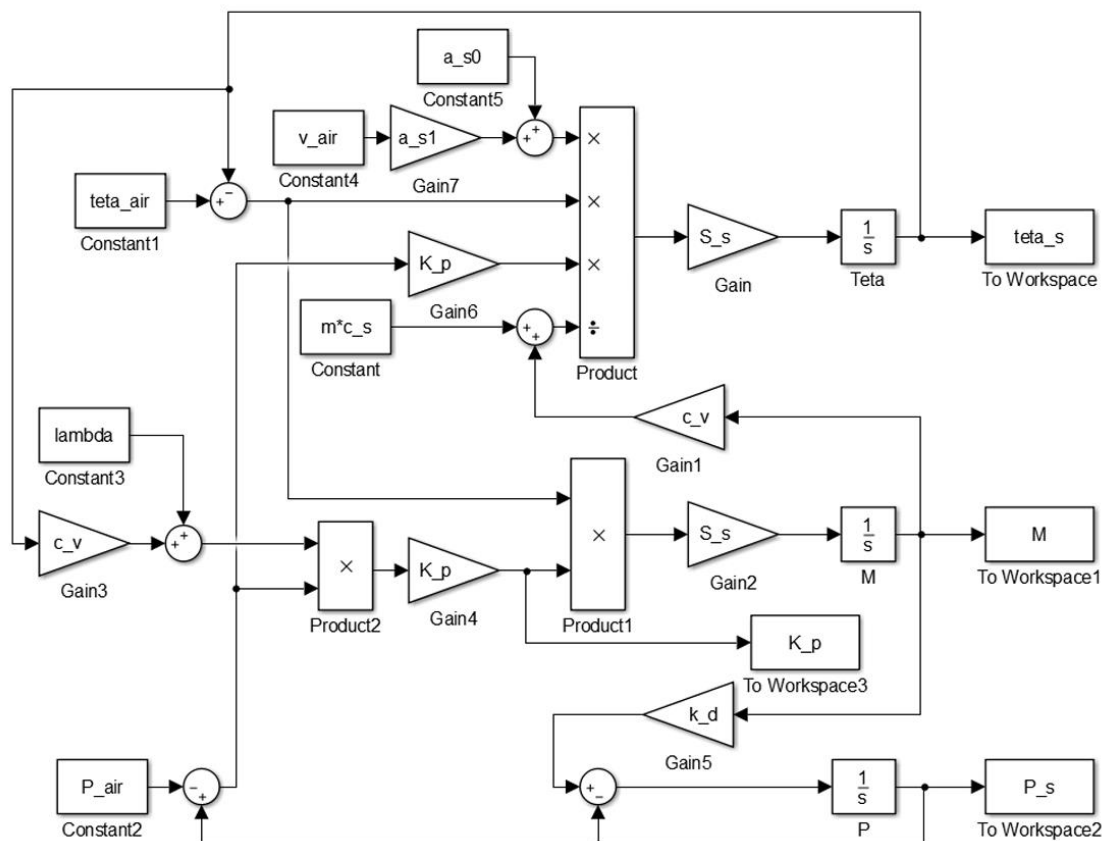


Рис. 1. Структура модели дегидрататора без учета сушащихся фруктов

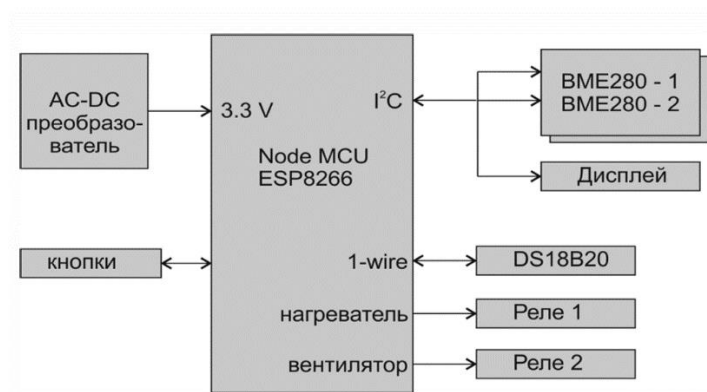


Рис. 2. Структурная схема системы управления дегидрататором

Схема электрических соединений представлена на рис. 3. В качестве особенностей реализации схемы электрических соединений следует упомянуть следующее:

- все модули, коммуникации с которым происходят по шине I²C подключаются на одну шину. Для исключения конфликта адресов датчиков BME280, которые по умолчанию имеют адрес на шине 0×76 , на плате второго датчика замыкается перемычка, и адрес переключается на 0×77 . Адрес дисплея, по умолчанию — $0 \times 3C$, и он не конфликтует с датчиками [8]. Для повышения скорости передачи по шине, согласно техническому описанию, линии SDA и SCL шины I²C подтянуты к питанию с помощью резисторов 4.7 кОм;

- цифровой датчик температуры DS18B20 подключен к микроконтроллеру по шине 1-Wire. Если для шины I²C подтяжка сигнальных линий SDA и SCL к питанию является желательной, но в ряде случаев информацию

можно передавать и без нее, то для шины 1-Wire подтяжка сигнальной линии к питанию является обязательной, в противном случае, в силу схемной реализации, датчик не сможет передавать информацию в контроллер;

– в силовой цепи подключения вентилятора и нагревателя использованы плавкие предохранители. Номинал тока срабатывания предохранителей выбирается исходя из мощности нагрузки. Для вентилятора, мощностью 20 Вт, выбран предохранитель на 0,15 А, для нагревателя мощностью 230 Вт выбран предохранитель на 1,5 А. Запас перегрузки по току составляет порядка 50 %, что гарантирует отсутствие ложных срабатываний, но обеспечивает защиту в случае короткого замыкания на нагрузку. При этом предельный ток симисторного реле (2А) также не будет превышен.

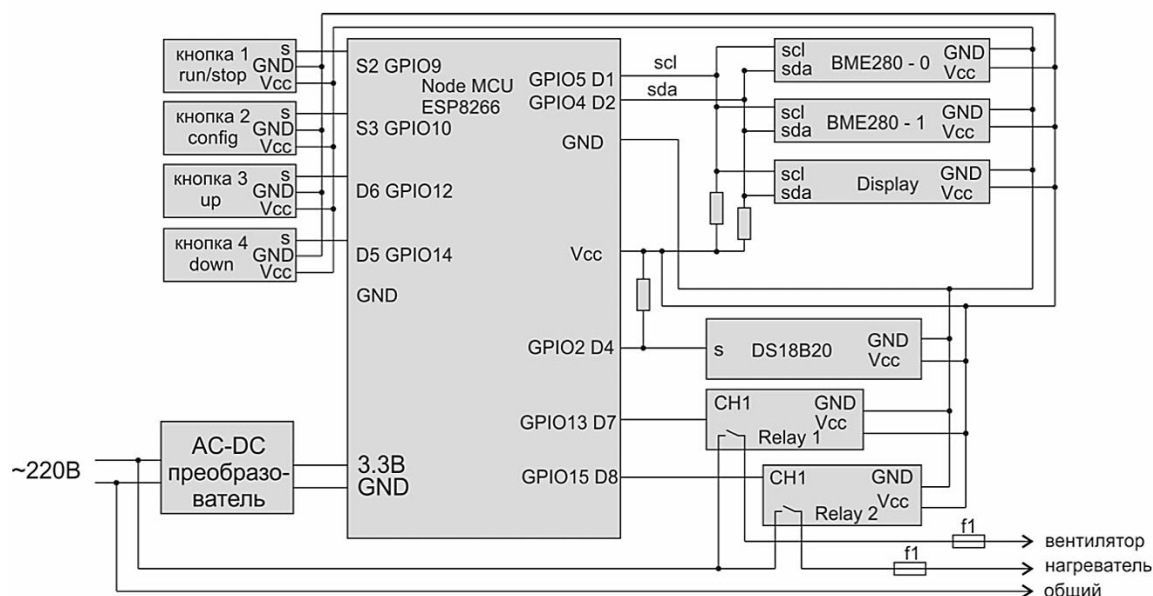


Рис. 3. Схема электрических соединений модулей системы управления сушильной установкой

Результаты исследования. Для тестового исследования процесса дегидрации на прототипе был проведен ряд экспериментов. Одним из первых экспериментов была экспериментальная тонкослойная сушка яблок. Яблоки были вымыты, высушены, разрезаны поперек на диски толщиной 7 мм (рис. 4, а). Точность измерения толщины диска: 0,1 мм. Разброс толщин дисков – 1 мм. Первые и последние диски, имеющие большую конусность, не использовались. Диски были размещены на решетках дегидратора, для определения необходимого количества, после чего собраны на тарелку и взвешены (рис. 4, б). Точность определения веса – 1 грамм. Начальная масса яблок: 577,2 грамм. После взвешивания диски были разложены по решеткам в прежнем порядке, и сфотографированы для определения площади. После сушки диски были вновь взвешены и измерена их толщина (рис. 4, в, г). Толщина дисков: 2 мм, вес – 89,4 грамм. Разница в весе составила 487,8 грамм.

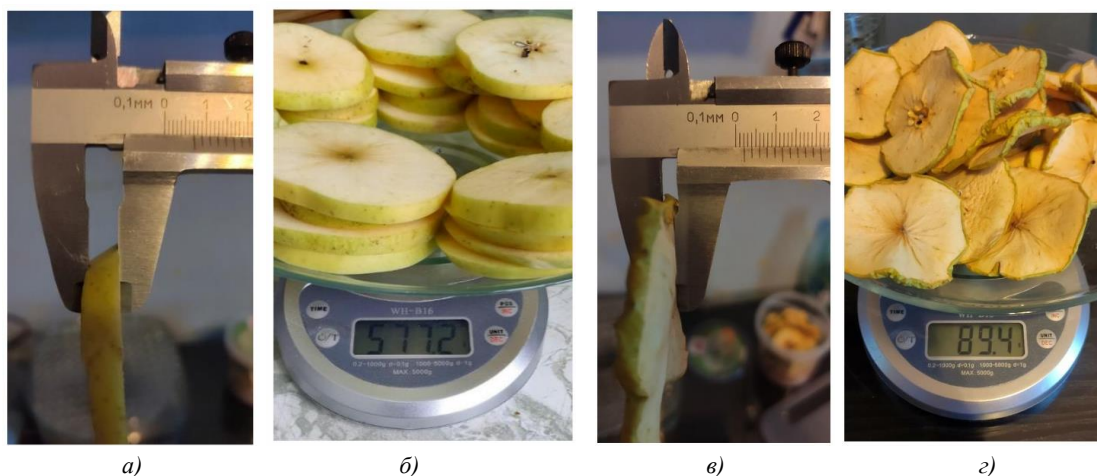


Рис. 4. Определение параметров яблочных дисков до и после сушки:

а – толщина диска до сушки; б – вес дисков до сушки; в – толщина диска после сушки; г – вес дисков после сушки

Энергия, затраченная на сушку, измерялась двумя способами:

– с помощью встроенного ваттметра (рис. 6), который измерял всю электрическую мощность, потребленную системой, и состоящую из мощности, потребляемой нагревателем, мощности, потребляемой вентилятором и мощности, потребляемой контроллером;

– косвенным методом, исходя из известной мощности нагревателя (210 Вт) и скважности работы реле управления нагревателем. Скважность, усредненная за 60 секунд выводилась в составе телеметрической информации в процессе работы дегидрататора. По показаниям встроенного ваттметра, потребленная энергия составила 1845 Вт·ч. Вентилятор потребляет 18 ватт, что позволяет определить энергию, затраченную непосредственно на сушку: 1700 Вт·ч.



Рис. 6. Показания табло встроенного ваттметра после окончания сушки на 1 этапе экспериментов

Телеметрическая информация о процессе дегидратации записывалась с массива датчиков и передавалась в Телеграм-бот каждую минуту. Управление дегидрататором также осуществлялось через команды телеграм-бота. Типичная картина телеметрической информации на экране бора приведена на рис. 7.



Рис. 7. Телеметрическая информация на экране бота

Блок одного сообщения телеметрической информации в формате json вы глядит следующим образом:

```
{
  "id": 269840,
  "type": "message",
  "date": "2022-01-16T11:30:53",
  "from": "DehydratorBot",
  "from_id": "user1724680776",
  "text": "121 52.31 37.91 27.69 100870.70 25.67 49.98 100898.66 24.90 26.45 100892.91 1.15 5.15 840.00 1000"
}
```

История работы дегидрататора экспортируется в текстовый файл в формате «машиночитаемый json», и с помощью программы на языке python преобразуется в текстовый файл с таблицей телеметрических переменных. Дальнейшая обработка данных производится в математическом пакете Matlab. Экспериментальные результаты, полученные после предварительной обработки телеметрии, приведены на следующих графиках (рис. 8–11).

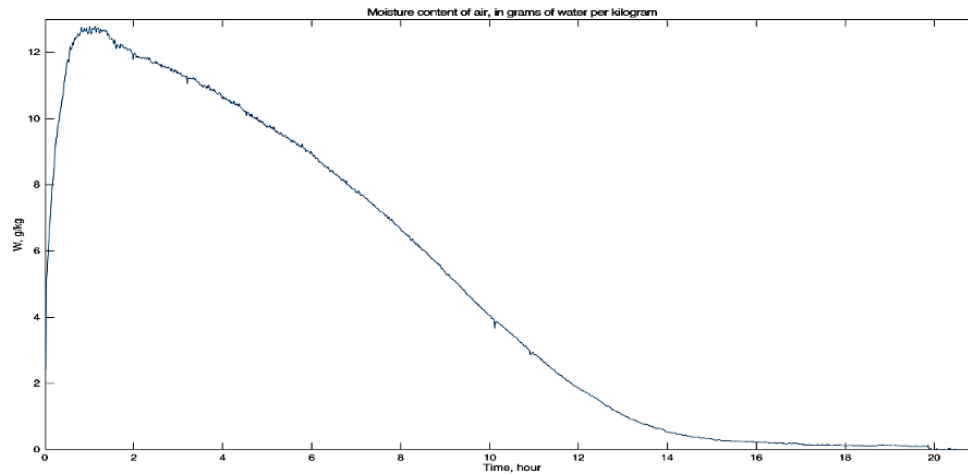


Рис. 8. Влажность воздуха на выходе сушилки

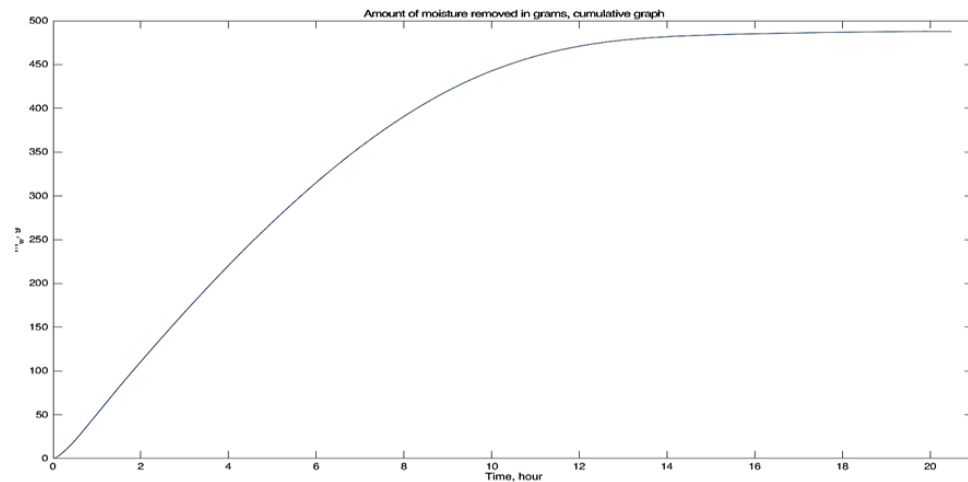


Рис. 9. Интегральная влагопотеря на выходе сушилки

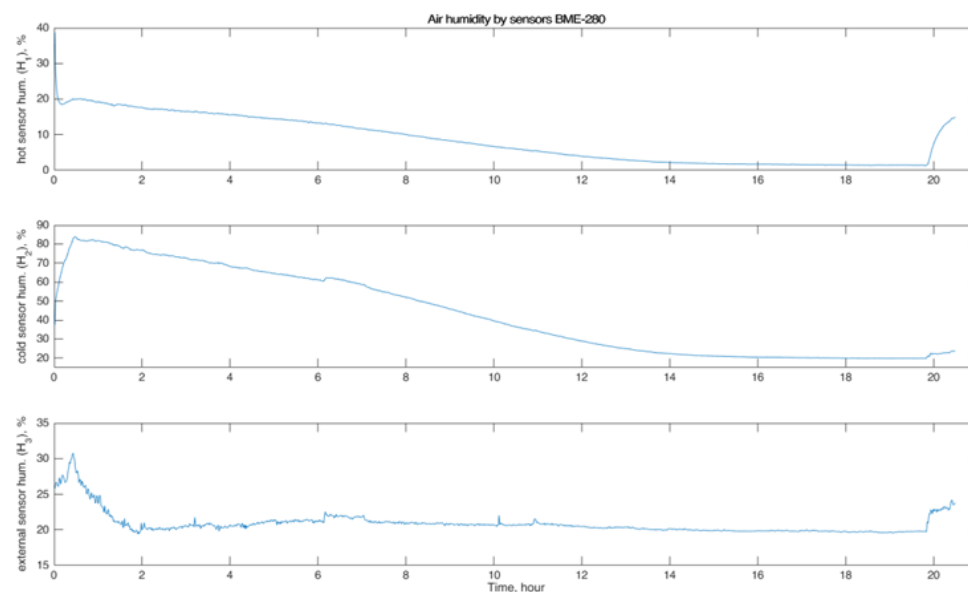


Рис. 10. Удельная влажность на датчиках в сушилке

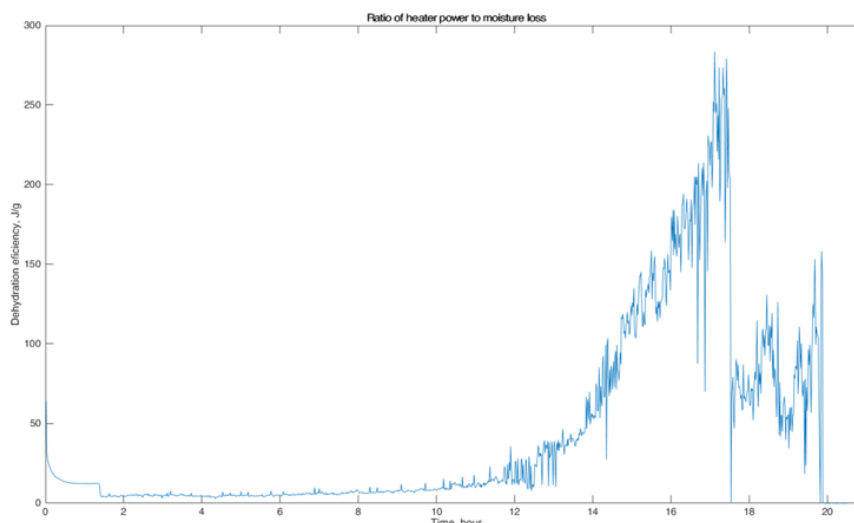


Рис. 11. Удельная эффективность (отношение влагопотери к мощности на нагревателе)

Обсуждение и заключение. Проведённое тестовое исследование процесса дегидратации на прототипе дегидрататора позволило экспериментально оценить ключевые параметры сушки на примере тонкослойной сушки яблочных дисков. В ходе работы был реализован комплексный подход к сбору и обработке данных: от контроля геометрических и массовых характеристик сырья до детального учёта энергозатрат и непрерывного мониторинга параметров процесса с помощью телеметрической системы.

Телеметрическая система, включающая массив датчиков и передачу данных в Телеграм бот с последующей обработкой в формате JSON, экспортом в табличный вид и анализом в Matlab, показала свою эффективность. Полученные графики (влагосодержание воздуха на выходе, интегральная влагопотеря, удельная влажность, удельная эффективность) позволили детально проследить динамику процесса дегидратации и оценить энергоэффективность работы установки. В частности, анализ удельной эффективности (отношения влагопотери к мощности нагревателя) даёт возможность оптимизировать режим работы дегидрататора для достижения наилучшего баланса между скоростью сушки и энергопотреблением.

Практическая значимость работы заключается в апробации прототипа дегидрататора и методики экспериментального исследования процессов сушки. Разработанная система сбора и обработки телеметрических данных может быть использована для тестирования и настройки аналогичных установок, а полученные количественные показатели — для сравнения с другими методами дегидратации и расчёта технико-экономических параметров. Таким образом, проведённое исследование подтвердило работоспособность прототипа дегидрататора, продемонстрировало эффективность выбранной методики эксперимента и заложило основу для последующих работ по совершенствованию технологии сушки.

Список литературы/References

1. Hatami S, Payganeh G, Mehrpanahi A. Energy and exergy analysis of an indirect solar dryer based on a dynamic model. *Journal of Cleaner Production*. 2020;244. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118809>
2. Jaszczur M, Dudek M, Rosen MA, Kolenda Z. An analysis of integration of a power plant with a lignite superheated steam drying unit. *Journal of Cleaner Production*. 2020;243. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118635>
3. Azaizia Z, Kooli S, Hamdi I, Elkhail W, Guizani AA. Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper. *Renewable Energy*. 2020;145:1972–1984. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.055>
4. Мякинков АГ. Расчет кинетики сушки зерна кукурузы (изучение гигроскопических свойств и особенностей конвективной сушки зерна кукурузы). *Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал*. 2000(2):444.
Myakinkov AG. Calculation of corn grain drying kinetics (study of hygroscopic properties and features of convective drying of corn grain). *Food and Processing Industry. Abstract Journal*. 2000(2):444.
5. Мирзаева МА, Мухтасархон АК. Технология сушки абрикосовых сортов, пригодных для сушки. *UNIVERSUM: Технические Науки*. 2020;12(81):90–92.
Mirzaeva MA, Mukhtasarkhon AK. Drying technology of apricot varieties suitable for drying. *UNIVERSUM: Technical Sciences*. 2020;12(81):90–92

6. Petković M, Filipović V, Filipović I, Lukyanov A, Studennikova S. Modeling of carrot thin layer convective drying process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029:012046. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012046>

7. Кенжеханова М.Б., Мамаева Л.А., Ветохин С.С., Тулекбаева А.К. Разработка технологии изготовления яблочных чипсов на основе результатов оценки технологических и потребительских свойств исходного яблочного сырья. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2024;144(2):43–53. <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2024-2-43-53>

Kenzhekhanova M.B., Mamaeva L.A., Vetokhin S.S., Tulekbaeva A.K. Development of technology for manufacturing apple chips based on the results of assessment of technological and consumer properties of raw apples. *The Journal of Almaty Technological University*. 2024;144(2):43–53 (In Russ.) <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2024-2-43-53>

8. Зайченко Д.А., Петюшев Н.Н., Евтушевская Л.В., Уложина М.Ю., Гоман Д.И., Станкевич О.Н. Разработка двухстадийной технологии сушки ягод и фруктов. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023;16(4):53–60. URL: <https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/626> (дата обращения 26.06.2026)

Zaichenko DA, Petyushev NN, Evtushevskaya LV, Ulozhinova MY, Goman DI, Stankevich ON. Development of a Two-Stage Technology for Drying Berries and Fruits. *Food Industry: Science and Technology*. 2023;16(4):53–60. (In Russ.) URL: <https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/626> (accessed 26.06.2026)

Об авторах:

Тимошенко Мирослав Константинович, студент Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), miroslav.timoshenko@gmail.com

Нгуен Суан Тьем, PhD, заместитель заведующего кафедрой автоматики и вычислительной техники Вьетнамского технического университета им. Ле Куй Дона, (11900, Вьетнам, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бактылием), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), conference.dts@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

М.К. Тимошенко: поиск и анализ источников, проведение экспериментов, подготовка текста, формирование выводов.

Нгуен Суан Тьем: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Miroslav K. Timoshenko, student Don State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), miroslav.timoshenko@gmail.com

Nguyen Xuan Thiem, PhD, Deputy Head of Automation and Computer Technology Department Le Quy Don Technical University (236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem District, Hanoi, 11900, Vietnam), conference.dts@gmail.com

Claimed contributorship:

MK Timoshenko: conceptualization, literature search and analysis, conducting experiments, drafting the manuscript, formulating conclusions.

Nguyen Xuan Tiem: scientific supervision, conceptualization, defining research aims and objectives, analyzing research results, revising the manuscript, refining conclusions.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 27.06.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 18.07.2026

Принята к публикации/Accepted 02.08.2026

ЧАСТНАЯ ЗООТЕХНИЯ, КОРМЛЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОРМОВ И ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА

SPECIFIC ANIMAL HUSBANDRY, ANIMAL FEEDING, FEED PRODUCTION TECHNOLOGIES, AND LIVESTOCK PRODUCTION



УДК 631.363.2/.6:621.365.55

Оригинальное эмпирическое исследование

Исследование рабочего процесса технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева

Д.А. Максак

Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград

✉ conf.dstu@gmail.com

Аннотация

Введение. В рамках национального проекта по ускоренному развитию животноводства критически важным становится модернизация кормоприготовительных предприятий. Повышение качества и сбалансированности кормов напрямую увеличивает продуктивность скота и снижает риски для здоровья человека. Однако зерновое, животное и минеральное сырье подвержено сильной микробной порче, где особую опасность представляют плесневые грибы, чьи микотоксины резко снижают питательность. Комбинированная конвективно-СВЧ обработка зернового и минерального сырья обеспечивает интенсивную декстринизацию крахмала, стопроцентное обеззараживание продукта и двукратное снижение энергозатрат. Цель исследования — определить рациональное сочетание параметров конвективного (до 60 °С) и СВЧ-нагрева (до 95–105 °С) в технологическом модуле для обеспечения высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов.

Материалы и методы. Влаготепловая обработка зерна — сложный процесс тепло- и массообмена: влага перемещается внутри материала и с его поверхности в окружающую среду, преимущественно в виде смеси пара и жидкости. При высокоинтенсивной тепловой обработке (например, ИК-нагреве) в зерне интенсивно испаряется влага — давление пара растёт, возникает избыточное давление, разрушающее структуру зерна, вызывающее его размягчение и вспучивание. Процесс делят на два периода: 1) нагрев до 95–105 °С (начало парообразования); 2) нагрев выше этой температуры — в нём происходят основные качественные преобразования (в т.ч. уничтожение микрофлоры). Для первого периода предлагают конвективный нагрев (простой и энергоэффективный), для второго — СВЧ-нагрев (обеспечивает быстрый, равномерный нагрев и резкий рост давления пара). Эффективность комбинированной обработки зависит от сочетания режимных параметров процесса.

Результаты исследования. В лабораторных исследованиях изучен конвективный нагрев зерна озимой пшеницы и ракушки. Построены зависимости температуры нагрева неподвижного и подвижного слоёв от продолжительности обработки. Установлено, что с ростом производительности температура материалов на выходе снижается: для зерна (95–105 °С) оптимальна производительность 300–500 кг/ч, для ракушки (60–80 °С) — свыше 650 кг/ч. Выявлена зависимость производительности и удельных энергозатрат от величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем: при увеличении зазора до 4,5 мм энергозатраты снижаются в 2–3,5 раза. Результаты использованы для доработки конструкторской документации технологического модуля комбинированной обработки (конвективный + СВЧ-нагрев) производительностью до 400 кг/ч.

Обсуждение и заключение. В ходе исследований определены зависимости и область конструктивно-технологических параметров предварительного конвективного нагрева для обработки ингредиентов комбикормов. На основе результатов доработана конструкторская документация модуля комбинированной (конвективной и СВЧ-) обработки производительностью до 400 кг/ч.

Ключевые слова: комбикорма, комбинированный нагрев СВЧ обработка, технологический модуль, декстринизация крахмала, обеззараживание кормов, удельные энергозатраты, динамика нагрева слоя, микотоксины

Для цитирования. Максак Д.А. Исследование рабочего процесса технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):58–72.

Original Empirical Research

Investigation of the Operating Process of a Technological Module for High-Intensity Combined Thermal Treatment of Compound Feed Ingredients Using Convective and Microwave Heating

Dmitry A. Maksak

Agricultural Research Center "Donskoy", Zernograd, Russian Federation

✉ conf.dstu@gmail.com

Introduction. Within the framework of the national project for accelerated livestock development, the modernization of feed preparation enterprises is becoming critically important. Improving feed quality and nutritional balance directly increases livestock productivity and mitigates human health risks. However, grain, animal, and mineral raw materials are highly susceptible to severe microbial spoilage, with molds posing a particular hazard due to their mycotoxins, which drastically reduce nutritional value. Combined convective-microwave treatment of grain and mineral raw materials ensures intensive starch dextrinization, 100% product decontamination, and a two-fold reduction in energy consumption. The objective of this study is to determine the rational combination of convective (up to 60 °C) and microwave heating (up to 95–105 °C) parameters within a technological module to ensure high-intensity thermal treatment of compound feed ingredients.

Materials and Methods. Hydrothermal treatment of grain is a complex heat and mass transfer process, wherein moisture migrates both within the material and from its surface into the environment, predominantly as a vapor-liquid mixture. During high-intensity thermal processing (e.g., infrared heating), rapid moisture evaporation occurs inside the grain, leading to a rise in vapor pressure and the generation of overpressure that disrupts the grain structure, causing its softening and puffing. This process is divided into two distinct periods: 1) heating up to 95–105 °C (the onset of vaporization); 2) heating above this temperature range, during which the primary qualitative transformations occur, including the elimination of microflora. For the first period, convective heating is proposed due to its simplicity and energy efficiency; for the second period, microwave heating is implemented to provide rapid, uniform heating and a sharp increase in vapor pressure. The overall efficiency of the combined treatment depends heavily on the integration of the process operating parameters.

Research Results. In laboratory studies, the convective heating of winter wheat grain and seashell flour was investigated. The temperature profiles of both stationary and moving beds were plotted as a function of processing duration. It was established that as the throughput increases, the discharge temperature of the materials decreases: for the grain (95–105 °C), the optimal throughput is 300–500 kg/h, whereas for the seashell flour (60–80 °C), it exceeds 650 kg/h. Furthermore, a correlation was identified between the throughput, specific energy consumption, and the clearance gap between the metering roller and the cutoff plate. Increasing this gap up to 4.5 mm reduces energy consumption by a factor of 2.0 to 3.5. These findings were subsequently applied to refine the engineering design documentation of the combined treatment technological module (convective + microwave heating) with a capacity of up to 400 kg/h.

Discussion and Conclusion. In the course of this research, the functional dependencies and the boundaries of design and technological parameters for preliminary convective heating during the processing of compound feed ingredients were determined. Based on these findings, the engineering design documentation was refined for the combined (convective and microwave) treatment module with a capacity of up to 400 kg/h.

Keywords: compound feed, combined heating, microwave treatment, technological module, starch dextrinization, feed decontamination, specific energy consumption, bed heating dynamics, mycotoxins

For citation. Maksak DA. Investigation of the Operating Process of a Technological Module for High-Intensity Combined Thermal Treatment of Compound Feed Ingredients Using Convective and Microwave Heating. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):58–72.

Введение. Реализация приоритетного национального проекта «Развитие АПК» по направлению «Ускоренное развитие животноводства» [5] предусматривает совершенствование и создание новых кормоприготовительных предприятий различного типажа. Основой его успешного развития является укрепление кормовой базы, что подразумевает создание сбалансированного качественного корма.

Улучшение качества кормов позволяет решать две основные задачи. Во-первых, повысить показатели продуктивности животноводства. Во-вторых, уменьшить количество вредных веществ, поступающих по пищевой цепочке человеку.

В реализации генетического потенциала продуктивности животных и птицы ведущую роль играет степень биобезопасности используемых комбикормов, основу которых составляют зерновые корма. Они являются и основным источником поступления в организм животных и птицы токсичных веществ – микотоксинов, что снижает питательность корма. Наряду с зерновыми кормами большой микробной порче подвержены и корма животного и минерального происхождения (мясокостная, кровяная, рыбная мука, ракушечник и др.), что также приводит к порче и снижению их питательности.

Из всех видов микроорганизмов, развивающихся в кормах, особую опасность представляют плесневые грибы, микотоксины которых приводят к следующим негативным последствиям [6]:

- снижают продуктивность животных и птицы и их воспроизводительную способность;
- уменьшают эффективность усвоения кормов и их использования на производство продукции;
- повышают восприимчивость животных и птицы к заболеваниям;
- увеличивают материальные затраты на лечение и профилактические мероприятия;
- ухудшают качество получаемой продукции, а в случае превышения допустимых концентраций микотоксинов — к полной непригодности к использованию;
- угрожают здоровью человека при появлении микотоксинов в мясе, яйцах, молоке и других продуктах животноводства.

Особенно сильно при микотоксикозах страдает иммунная система. В результате её поражения возрастает вероятность появления вирусной или бактериальной инфекции. Из сельскохозяйственных животных наиболее чувствительны к микотоксикозам свиньи и птица вследствие особенностей строения пищеварительного тракта и типа кормления.

В настоящее время, по данным [6], более 70 % всех исследованных в южных регионах страны образцов зерна и зерносодержащих комбикормов поражены разными видами токсинообразующих грибов, из которых 65 % исследованных проб содержали два и более микотоксина. Преимущество в контаминации, как цельного зерна, так и готовых кормов, принадлежит четырем родам микромицетов: *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicilium* и *Mucor*, которые являются мощными биодеструкторами и полибиотрофами, что свидетельствует не только об опасном загрязнении кормов, но и о неблагоприятии почв (техногенное загрязнение почв).

Поэтому, одной из основных задач роста производства животноводческой продукции, увеличения продуктивности животных и птицы является повышение кормовой ценности фуражного зерна, являющегося основным компонентом комбикормов, за счёт улучшения качества его предварительной обработки. А также в связи с повышенной в последние годы зараженностью основных ингредиентов комбикормов (зерновых кормов и кормов животного и минерального происхождения) патогенными микроорганизмами и продуктами их жизнедеятельности и угрозой возникновения массовых опасных заболеваний животных и птицы, в том числе в результате их передачи через зараженное при хранении грызунами и дикой птицей зерно, требует включения в состав технологических линий кормоприготовительных предприятий оборудования для его обеззараживания и стерилизации. Более существенную роль это приобретает в современных условиях, когда снижение издержек на подготовку кормов существенно отразится на рентабельности производства продукции животноводства.

В настоящее время предложено много способов, позволяющих значительно повысить питательные свойства и снизить в зерновых и кормах животного и минерального происхождения уровень патогенных микроорганизмов, из которых качественные показатели достигаются при тепловых способах обработки. Тепловая обработка способствует разрыхлению структуры зерна, увеличению его удельного объема и гигроскопичности, уменьшению гладкости поверхности и стеклянного блеска. Нативный крахмал зерна превращается в модифицированный. Содержание сахаров и декстринов увеличивается в 2–3 раза, степень клейстеризации (декстринизации) достигает 35 % и выше. Вследствие гидролитического расщепления крахмала его доступность для организма животных повышается в 2–5 раз и увеличивается в 1,5–2 раза переваримость корма. Уровень клетчатки снижается на 23 %. При тепловой обработке зерновых кормов и кормов животного и минерального происхождения содержание грибной флоры снижается на 95,5 %, бактериальной – на 99,9 % [7, 8]. Однако эффективность большинства существующих тепловых способов остаётся все ещё незначительной (высокая энергоёмкость и материалоемкость оборудования).

Сущность тепловой обработки заключается в перемещении влаги в виде жидкости (или пара) внутри влажного тела к его поверхности и далее в газообразную среду или на поверхность другого тела. При этом под действием температуры и давления в присутствии некоторого количества влаги в обрабатываемом материале происходят сложные биохимические преобразования.

Проведенными исследованиями [9, 10] установлено, что обработка зерна СВЧ энергией, а также применение комбинированного (совмещающего конвективный и СВЧ-нагрев) способа обработки позволяет увеличить степень декстринизации крахмала зерна до 60 %, обеспечить снижение общего уровня содержания грибной и бактериальной обсеменённости продукта до 100 %, в 1,5–2,0 раза снизить общий удельный расход энергии по сравнению с ИК-обработкой. При этом за счет СВЧ-обработки происходит интенсивный нагрев обрабатываемого материала до температуры свыше 105°C и практически мгновенное преобразование капиллярной воды в пар, что приводит к разрушению структуры материала и соответствующим биохимическим преобразованиям.

В этой связи представляется целесообразным высокоинтенсивную тепловую обработку зерновых кормов и кормов минерального происхождения проводить с использованием рационального сочетания параметров конвективного и последующего СВЧ-нагрева реализованных в технологическом модуле. Согласно основным зоотехническим и технологическим требованиям температура зернового материала и ракушки после конвективного нагрева должна превышать 60°C и составлять 95–105°C.

Материалы и методы. Влаготепловая обработка зернового материала представляет собой сложный теплофизический и физико-химический процесс, состоящий из переноса теплоты и влаги внутри материала (внутренний тепло- и массообмен) и тепло- и влагообмен от поверхности материала в окружающую среду (внешний тепло- и массообмен). При этом влага в зерне, подвергаемом тепловой обработке, переносится в виде смеси пара и жидкости.

Переносом связанного вещества (влаги) в обрабатываемом материале преследуют различные цели, но требования к качеству продукта определяют круг вопросов, которые необходимо решить при его технологической обработке. Отличительной особенностью технологических процессов, в результате которых производят продукт с определенными, заранее заданными потребительскими свойствами, является воздействие отдельных факторов (температура, давление, влагосодержание и др.) или их совокупности, вызывающие изменения в продукте.

В процессе высокоинтенсивной тепловой обработки, традиционно осуществляемой при помощи ИК-нагрева, внутри зерна происходит интенсивное испарение влаги. В зависимости от интенсивности нагрева и парообразования, а также скорости истечения парогазовой смеси давление пара внутри зерна резко возрастает и приводит к вытеснению парогазовой смеси из внутренних слоев зерна к наружным. Возникающее давление внутри зерна за счет нагревания и испарения жидкости релаксируется не мгновенно, а с течением определенного времени. В результате, скорость нарастания давления пара значительно больше скорости его релаксации и в определенный момент времени внутри капилляров зерна возникает избыточное давление, приводящее к разрушению структуры зерна, его размягчению и вспучиванию.

Таким образом, наиболее важным моментом в процессе высокоинтенсивной тепловой обработки является фазовый переход влаги внутри зерна в пар, который должен осуществляться с достаточно высокой интенсивностью.

Следовательно, весь процесс высокоинтенсивной тепловой обработки условно можно разделить на два периода, связанные с фазовым переходом жидкости в пар внутри капилляров зерна. Первый период процесса характеризуется нагревом зерна до температуры начала парообразования внутри капилляров (95–105°C), второй — нагревом выше этой температуры. При этом основные качественные преобразования будут происходить во втором периоде обработки, определяющем не только качество структурных преобразований и уничтожения микрофлоры ингредиентов комбикормов, но и энергетику всего процесса.

С учётом этого и результатов исследований [9, 10] первый период предлагается осуществлять с использованием конвективного нагрева, поскольку он прост в реализации и характеризуется сравнительно небольшими затратами энергии на процесс. Для второго (основного) периода обработки представляется целесообразным применение СВЧ-нагрева, обеспечивающего быстрый и равномерный нагрев, высокую интенсивность тепломассопереноса, резкий рост давления пара внутри капилляров, приводящего к разрушению структуры материалов и уничтожению патогенных микроорганизмов.

Очевидно, что результаты комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов могут быть достигнуты при определенном сочетании режимных параметров технологического процесса, определяющих его выходные показатели.

Такую связь между входными и выходными параметрами процесса можно представить координатной матрицей технологического процесса высокоинтенсивной тепловой обработки фуражного зерна с использованием конвективного и СВЧ-нагрева [11].

Из общей схемы технологического процесса высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с помощью координатной матрицы были определены основные параметры, влияющие на протекание процесса конвективного нагрева.

Входные параметры технологического процесса включают в себя управляющие воздействия – зоотехнические требования (качество получаемого продукта K_{mp} , температура обработки T_{mp} , влажность продукта W_{mp}), энергетические (затраты мощности N_3), производственные (необходимое количество получаемого продукта G_{mp}), конструктивные (аэродинамическое сопротивление H_k , температура конструктивных элементов $T_{кэ}$) и возмущающие воздействия – природно-климатические (температура $T_{ви}$, влажность $\phi_{ви}$, давление $P_{ви}$, скорость $v_{ви}$, и удельный расход $l_{ви}$ окружающего воздуха), внутренние параметры обрабатываемого материала (коэффициенты тепло- и массообмена α и α_m , диффузии тепла и влаги a и a_m , порозность слоя обрабатываемого материала Π , термоградиентный коэффициент δ , коэффициенты теплоемкости c и теплопроводности λ , коэффициент диэлектрической проницаемости ϵ , общий коэффициент теплопередачи k , исходные температура $T_{зи}$, влажность $W_{зи}$ и качество $K_{зи}$ обрабатываемого материала).

Базовыми процессами при комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработке ингредиентов комбикормов являются конвективный нагрев и последующая СВЧ-обработка. Дозирование и транспортирование являются необходимыми связующими звеньями, но они не изменяют физико-механических и технологических свойств обрабатываемого материала. Рабочими элементами для выполнения базовых процессов являются, соответственно, центробежный вентилятор с ТЭНами и магнетрон с источником питания.

Входными параметрами конвективного нагрева являются: начальная влажность $W_{зи}$, температура $T_{зи}$, и качество обрабатываемого материала $K_{зи}$; температура $T_в$, относительная влажность $\phi_в$, давление $P_в$, скорость $v_в$ и удельный расход $l_в$ теплоносителя; толщина слоя обрабатываемого материала h_3 , расход материала G_3^k , продолжительность конвективного нагрева t_2 , величина зазора h и частота вращения n_2 дозирующей катушки.

К выходным параметрам относятся: конечная влажность W_3^k , температура T_3^k зернового материала; конечная температура $T_в^k$, относительная влажность $\phi_в^k$, давление $P_в^k$, скорость $v_в^k$ и удельный расход $l_в^k$ отработавшего теплоносителя; удельные энергозатраты $E_{y\partial 2}$.

Кроме входных и выходных параметров, процесс конвективного нагрева характеризуется внутренними параметрами слоя обрабатываемого материала, к основным из которых относятся качественные характеристики физических, механических, химических, теплофизических и термодинамических свойств: коэффициенты тепло- и массообмена α и α_m , диффузии тепла и влаги a и a_m , порозность слоя зерна Π , термоградиентный коэффициент δ , коэффициенты теплоемкости c и теплопроводности λ , общий коэффициент теплопередачи k и др.

Все внутренние параметры процесса конвективного нагрева, так же, как и входные, определяют её результаты. Большинство из них определяется из литературных источников и, таким образом, выступают в роли исходных данных.

Большое количество входных параметров создает значительные трудности при проведении исследований. Поэтому часть входных параметров, такие как исходная влажность, температура и качество ингредиентов комбикормов; относительная влажность, температура, давление, скорость и удельный расход окружающего воздуха и отработавшего теплоносителя, приняли возмущающими и учитывали их статистически. Остальные входные параметры отнесли к управляющим.

Особенность конвективного способа нагрева состоит в том, что для подвода тепла к обрабатываемому материалу и удаления испарившейся из него влаги применяется газообразный теплоноситель – нагретый воздух. При этом происходит целый ряд взаимосвязанных явлений, основными из которых являются следующие:

- передача тепла от нагретого теплоносителя к поверхности материала;
- распространение тепла от поверхности материала к его внутренним слоям;
- перемещение влаги внутри материала от центра к поверхности;
- испарение влаги;
- диффузия паров влаги с поверхности обрабатываемого материала в окружающую среду.

Математическая модель для нахождения оптимальных значений управляющих параметров технологического процесса конвективной обработки ингредиентов комбикормов представляет собой следующую зависимость [12]:

$$W_3^k - W_p^k = (W_u - W_p^k) \cdot e^{-\theta \tau_k^n}, \quad (1)$$

где W_3^k — влажность зерна в текущий момент времени конвективного нагрева, %; W_u — исходная влажность зерна, %; W_p^k — равновесная влажность зерна, %; θ — коэффициент, являющийся функцией максимальной

скорости удаления влаги $N_{\max}$; n — коэффициент, зависящий от свойств материала, которая с достаточной степенью точности отображает характер изменения параметров при конвективном нагреве обрабатываемого материала.

При этом удельный расход энергии в единицу времени на конвективный нагрев может быть определен по формуле:

$$E_k = \frac{gl(I - I_0)}{\rho_n V_{cl}^k \tau_k \eta_k}, \quad (2)$$

где g — количество испаренной влаги, кг; l — удельный расход теплоносителя, кг/кг_{исп. вл.}; I — энтальпия теплоносителя (подогретого воздуха), Дж/кг; I_0 — энтальпия атмосферного воздуха, Дж/кг; ρ_n — насыпная плотность зерна, кг/м³; V_{cl}^k — объем слоя зерна при конвективном нагреве, м³; $\eta_k = 0,35-0,40$ — коэффициент полезного действия, учитывающий потери энергии при нагреве теплоносителя.

Таким образом, анализ выражений (1) и (2) показывает, что основными параметрами конвективного нагрева являются: исходная влажность, температура и качество обрабатываемого материала; параметры теплоносителя (исходные и конечные): относительная влажность, температура, давление, скорость и расход теплоносителя, теплофизические параметры воздуха и пара (энтальпия, теплоемкость и др.); продолжительность конвективного нагрева, толщина продуваемого слоя, порозность, состояние и площадь поверхности нагрева обрабатываемого материала.

Производительность блока конвективного нагрева определяется производительностью установленного в нижней части дозирующего устройства, включающего катушечный (барабанный) и шнековый дозатор.

Массовый расход катушечного (барабанного) дозатора определяют по формуле:

$$G_k = S_{жк} \cdot a \cdot z \cdot n_c \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (3)$$

где $S_{жк}$ — площадь поперечного сечения одного желобка, м²; a — длина рабочей части желобка, м; z — число желобков; n_c — частота вращения катушки (барабана), с⁻¹; ρ — плотность зернового материала, кг/м³; φ — коэффициент наполнения желобков ($\varphi = 0,8-0,9$).

Мощность, расходуемая на привод катушечного (барабанного) дозатора, определяется в основном трением материала, захватываемого катушкой (барабаном), о вышележащие слои:

$$N_{\pi} = \frac{P_{тр} \cdot v \cdot k_1}{1000} = \frac{f \cdot p \cdot F_{\delta} \cdot v \cdot k_1}{1000}, \quad (4)$$

где $P_{тр}$ — сила трения зерна, захватываемого катушкой (барабаном), Н; f — коэффициент трения обрабатываемого материала; p — давление материала на поверхность катушки (барабана), Па; F_{δ} — площадь поперечного сечения горловины над катушкой, м²; v — окружная скорость катушки (барабана), м/с; k_1 — коэффициент, учитывающий затраты энергии на возможное измельчение продукта при захватывании его желобком (для порошкообразных $k_1 = 1$; для кусковых $k_1 = 2$).

Массовый расход шнекового питателя определяют по формуле:

$$G_{ш} = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot (D^2 - d^2) \cdot s \cdot \omega \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (5)$$

где D и d — диаметры шнека и вала шнека, м; $s = (0,8-1,0)$; D — шаг винта, м; ρ — плотность зерна, кг/м³; φ — коэффициент заполнения ($\varphi = 0,8-1,0$) ω — угловая скорость, рад/с.

Мощность, необходимая для привода шнека, равна:

$$N = 10^4 \cdot G_{ш} \cdot (Lk' + H) \cdot k'' / \eta, \quad (6)$$

где L — горизонтальная проекция пути обрабатываемого материала, м; H — высота подъема материала ($H=0$), м; k' — коэффициент, учитывающий сопротивление перемещению материала в корпусе шнека ($k' = 1,2-2,5$); k'' — коэффициент, учитывающий потери на трение в подшипниках ($k'' = 1,1-1,2$); η — КПД привода.

Анализ приведенных выражений (3)–(6) позволяет определить главные факторы, которые оказывают основное влияние на изменение производительности и потребляемой мощности дозирующего устройства. К ним относятся геометрические размеры и скорость вращения. Варьируемыми (управляемыми) факторами будет величина зазора в катушечном (барабанном) дозаторе. Значение производительности и мощность шнекового питателя будет определяться производительностью катушечного (барабанного) дозатора.

Для проведения исследований ВНИПТИМЭСХ был разработан и изготовлен совместно с НПП «МАГРАТЕП» (г. Фрязино) технологический модуль для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева, представленный на рис. 1.

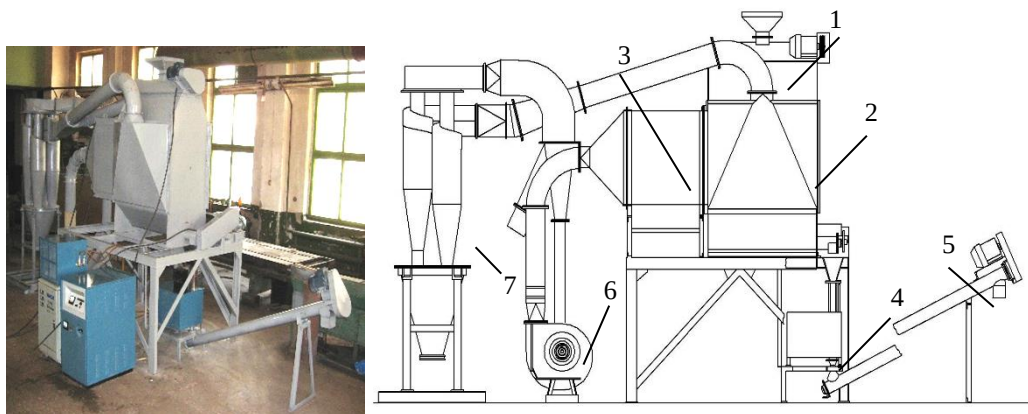


Рис. 1. Технологический модуль для комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработки фуражного зерна: 1 — блок дозирования фуражного зерна; 2 — блок конвективного нагрева; 3 — блок ТЭН; 4 — блок СВЧ-обработки; 5 — блок выгрузки готовой продукции; 6 — вентилятор; 7 — циклон

Исследование рабочего процесса комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов на данном этапе предусматривали изучение области существования конструктивно-технологических параметров конвективного нагрева технологического модуля, обеспечивающего предварительный нагрев ингредиентов комбикормов до 95–105 °С.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии со специально разработанной методикой, предусматривающей проведение многофакторного эксперимента с определением динамики конвективного нагрева, определение изменения производительности блока конвективного нагрева и удельных затрат энергии, с привлечением аппарата дисперсионного анализа для обработки экспериментальных данных.

Входными параметрами блока конвективного нагрева являются размер отверстий продуваемых решет, параметры теплоносителя (температура, давление, влажность, расход), параметры обрабатываемого материала (температура, влажность, качество), величина зазора между дозирующей катушкой и отсекателем, продолжительность конвективного нагрева.

Параметрами, характеризующими процесс конвективного нагрева ингредиентов комбикормов, являются производительность и удельный расход энергии.

При оценке технологического процесса конвективного нагрева ингредиентов комбикормов за критерий оптимизации принят показатель энергоемкости – удельный расход энергии, который рассчитывают по формуле:

$$\mathfrak{E} = \frac{N_{изм}}{Q}, \quad (7)$$

где $N_{изм}$ — мощность, расходуемая на конвективный нагрев (за вычетом мощности холостого хода), кВт; Q — производительность блока конвективного нагрева, кг/ч.

При проведении экспериментальных исследований измерение необходимых параметров осуществлялось приборами, точность которых позволяет объективно судить об измеряемых величинах. Мощность, потребляемая на привод рабочих органов, регистрировалась трехфазным измерительным комплексом К-505. Контроль температуры теплоносителя обрабатываемого материала осуществляли в 15 точках с помощью термопар, подключенных к универсальному вольтметру В7–16А, и ртутного термометра. Расход воздуха (или теплоносителя) находили, измеряя скорость анемометром и площадь сечения измеряемого участка.

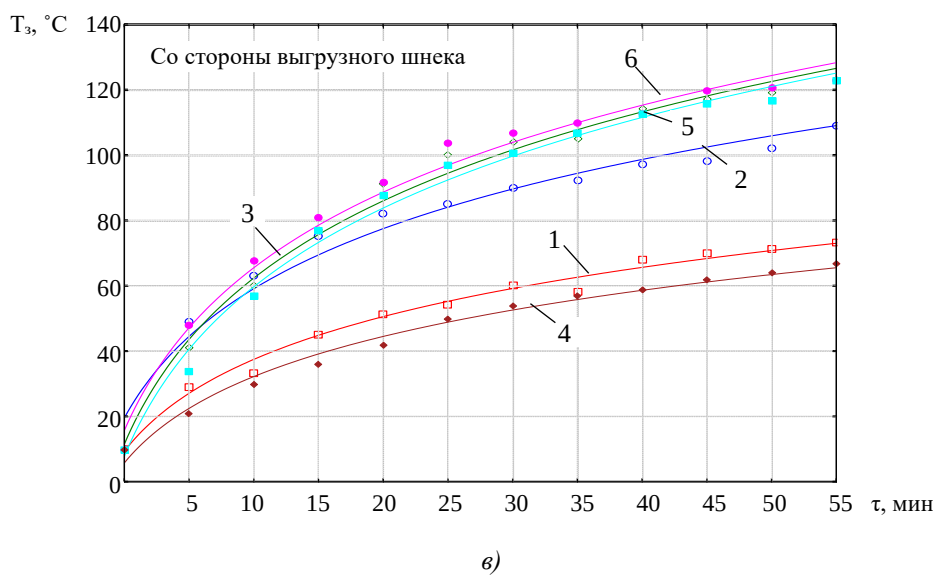
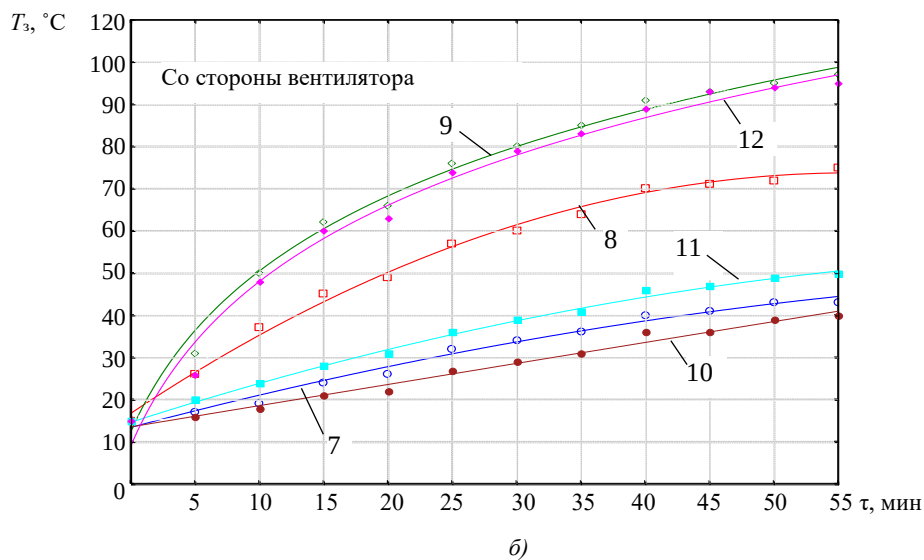
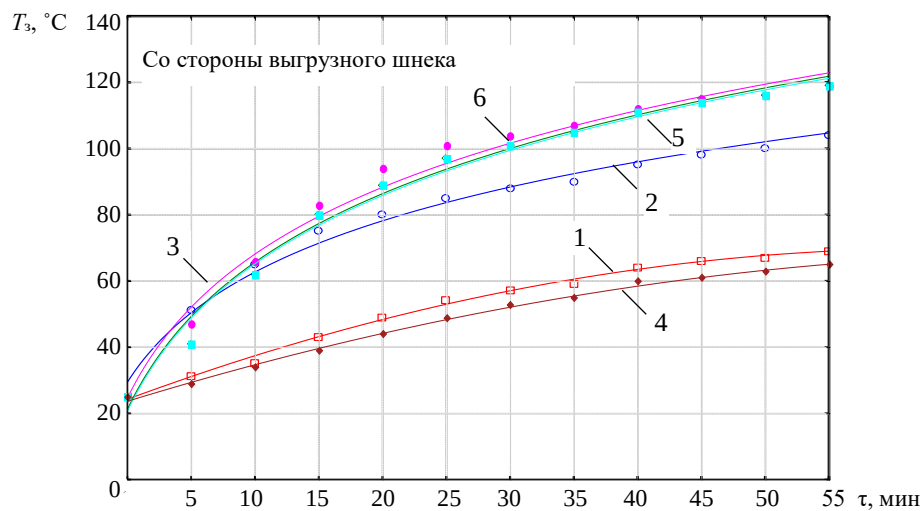
Для определения барометрического давления использовали барометр-анероид, установленный в помещении, где располагается технологический модуль. Его показания записывали через каждые 3 часа. Показания психрометра, расположенного снаружи и внутри помещения и предназначенного для измерений относительной влажности атмосферного воздуха, записывали через каждый час.

Влажность отработавшего теплоносителя определяли как средние значения с использованием психрометра, устанавливаемого в отводящем трубопроводе.

Результаты экспериментов систематизировались и обрабатывались по прикладным статистическим программам на ПЭВМ.

Результаты исследования. Лабораторные исследования процесса конвективного нагрева ингредиентов комбикормов выполнены на зерне озимой пшеницы и ракушке. По результатам исследований построены экспериментальные зависимости изменения температуры нагрева неподвижного и подвижного слоя обрабатываемых образцов при конвективном нагреве.

Результаты исследований процесса конвективного нагрева неподвижного слоя зерна пшеницы и ракушки представлены в виде кривых роста средней температуры слоя обрабатываемого материала от продолжительности нагрева на рис. 2.



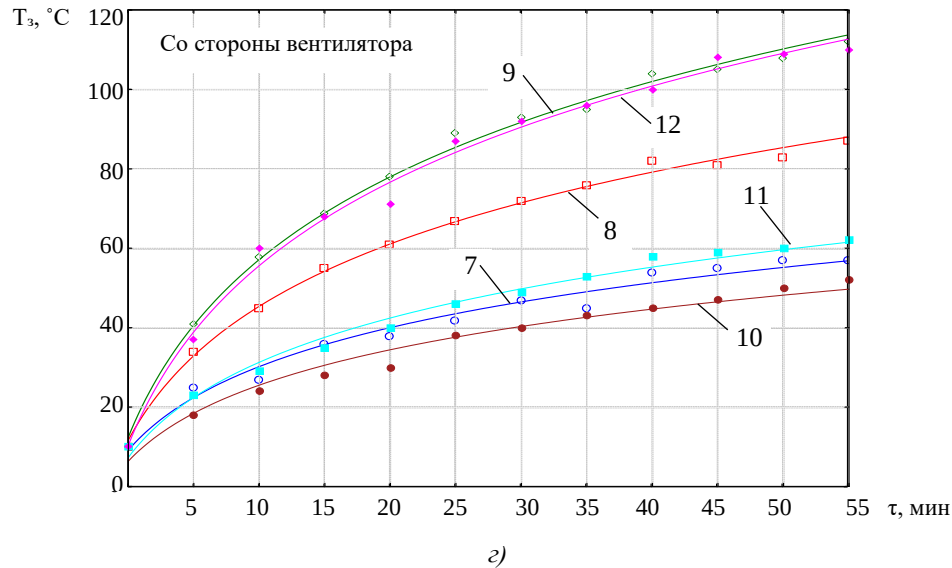


Рис. 2. Изменение температуры нагрева неподвижного слоя зерна пшеницы (а, б) и ракушки (в, г) при конвективном способе в четырех зонах измерения (3, 6, 9, 12 — на высоте 16,5 см от основания блока; 2, 5, 8, 11 — 43 см; 1, 4, 7, 10 — 80 см)

В результате обработки опытных данных конвективного нагрева неподвижного слоя обрабатываемых материалов были получены функциональные зависимости изменения температуры нагрева зерна пшеницы и ракушки в двух камерах блока конвективного нагрева при указанных выше параметрах теплоносителя от продолжительности обработки.

Со стороны выгрузного шнека
зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_1^п &= 16,70 + 7,69 \cdot \tau - 0,29 \cdot \tau^2 \\ T_2^п &= 29,18 + 69,79 \cdot \lg(\tau) \\ T_3^п &= 20,91 + 93,33 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} T_4^п &= 64,44 - 12,61 \cdot \lg(\tau) \\ T_5^п &= 119,47 - 20,02 \cdot \lg(\tau) \\ T_6^п &= 116,05 - 13,88 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Со стороны вентилятора
зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_7^п &= 50,65 - 14,23 \cdot \lg(\tau) \\ T_8^п &= 78,80 - 21,68 \cdot \lg(\tau) \\ T_9^п &= 99,76 - 28,73 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{10}^п &= 43,24 - 14,82 \cdot \lg(\tau) \\ T_{11}^п &= 61,59 - 15,33 \cdot \lg(\tau) \\ T_{12}^п &= 97,79 - 28,91 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ракушка

$$\left. \begin{aligned} T_7^р &= 54,65 - 14,23 \cdot \lg(\tau) \\ T_8^р &= 85,33 - 15,08 \cdot \lg(\tau) \\ T_9^р &= 101,40 - 19,93 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{10}^р &= 45,24 - 14,82 \cdot \lg(\tau) \\ T_{11}^р &= 63,59 - 15,33 \cdot \lg(\tau) \\ T_{12}^р &= 102,79 - 28,91 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Неравномерность нагрева подвижного слоя обрабатываемого материала по длине обеих камер блока конвективной обработки в среднем составила на высоте 16,5 см — 2–3 °C, 43 см — 6–22 °C, 80 см — 7,5–10 °C.

При конвективном нагреве подвижного слоя обрабатываемых материалов характер изменения температуры зерна пшеницы и ракушки в блоке конвективной обработки от параметров процесса может быть представлен графически следующей поверхностью рис. (3а, 4а) и адекватно описан полиномом 2-й степени:

Со стороны выгрузного шнека

зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_2^n &= 113,16 - 0,83 \cdot \tau + 0,24 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot \tau \cdot H - 0,01 \cdot H^2 \\ T_2^n &= 99,91 - 0,84 \cdot \tau + 1,14 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,0002 \cdot \tau \cdot H - 0,02 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

ракушка

$$\left. \begin{aligned} T_2^n &= 115,73 - 0,83 \cdot \tau + 0,34 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,003 \cdot \tau \cdot H - 0,01 \cdot H^2 \\ T_2^n &= 103,05 - 0,84 \cdot \tau + 1,20 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,0002 \cdot \tau \cdot H - 0,02 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

Со стороны вентилятора

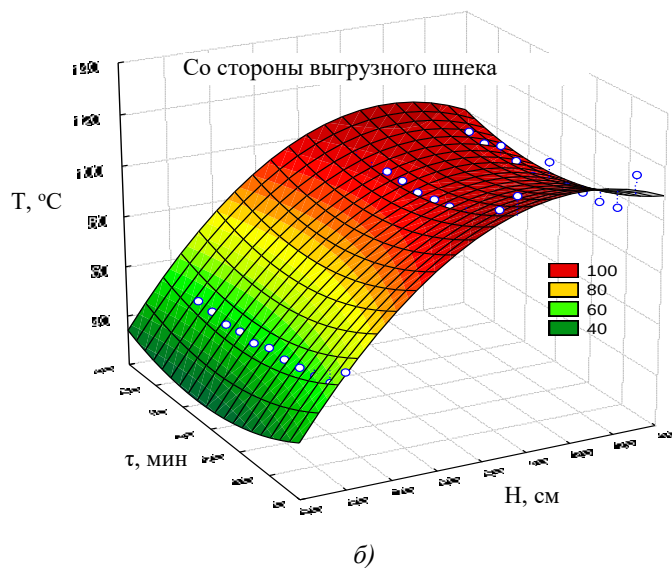
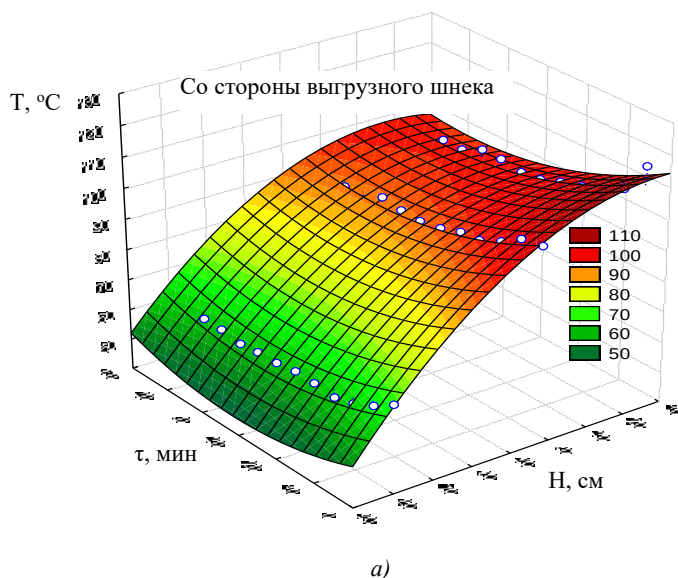
зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_1^n &= 108,75 - 1,33 \cdot \tau - 0,68 \cdot H + 0,02 \cdot \tau^2 + 0,003 \cdot \tau \cdot H - 0,0002 \cdot H^2 \\ T_1^n &= 118,25 - 1,23 \cdot \tau - 1,59 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot \tau \cdot H + 0,01 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

ракушка

$$\left. \begin{aligned} T_1^n &= 104,62 - 1,11 \cdot \tau - 0,17 \cdot H + 0,02 \cdot \tau^2 + 0,00008 \cdot \tau \cdot H - 0,01 \cdot H^2 \\ T_1^n &= 126,39 - 1,23 \cdot \tau - 1,81 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot \tau \cdot H + 0,01 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Примечательно, что вид этой поверхности сохраняется для материала всех четырех зон области измерения (рис. 3б–г, 4б–г).



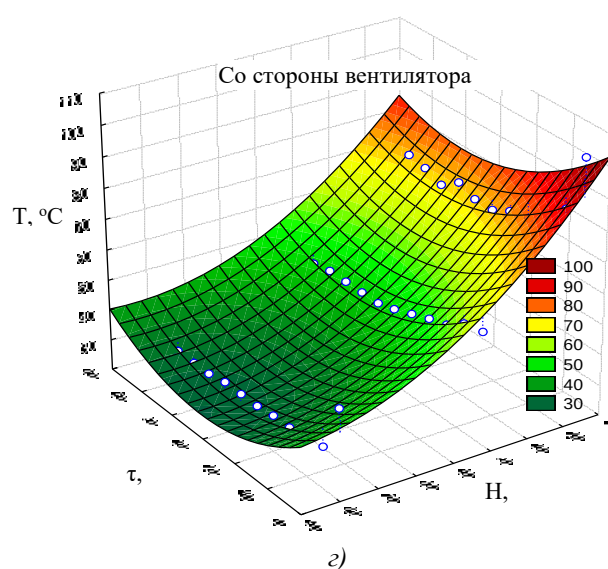
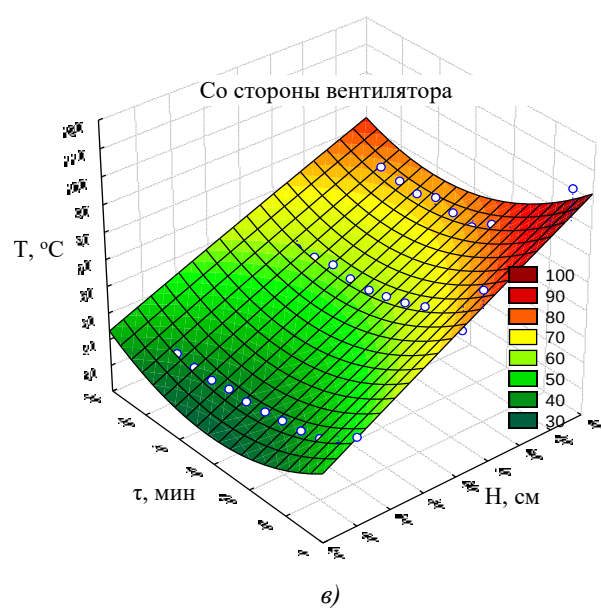
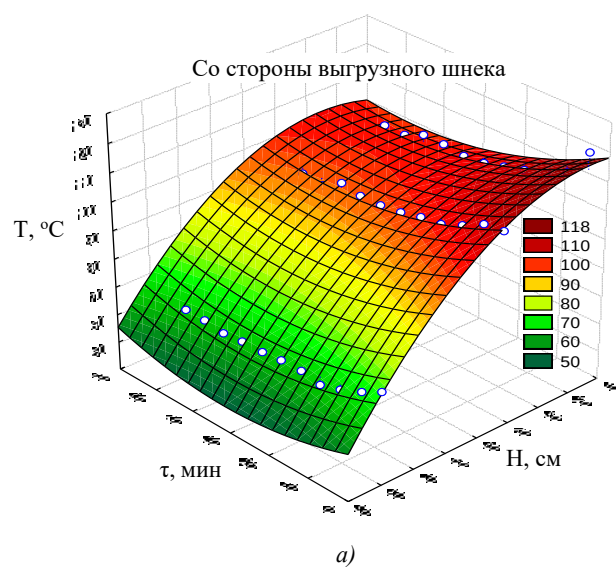


Рис. 3. Поверхность отклика функции $T=f(H, \tau)$ подвижного слоя зерна четырех зон области измерения:
 а — правая сторона блока конвективной обработки; б — левая сторона блока конвективной обработки;
 в — правая сторона блока конвективной обработки; з — левая сторона блока конвективной обработки



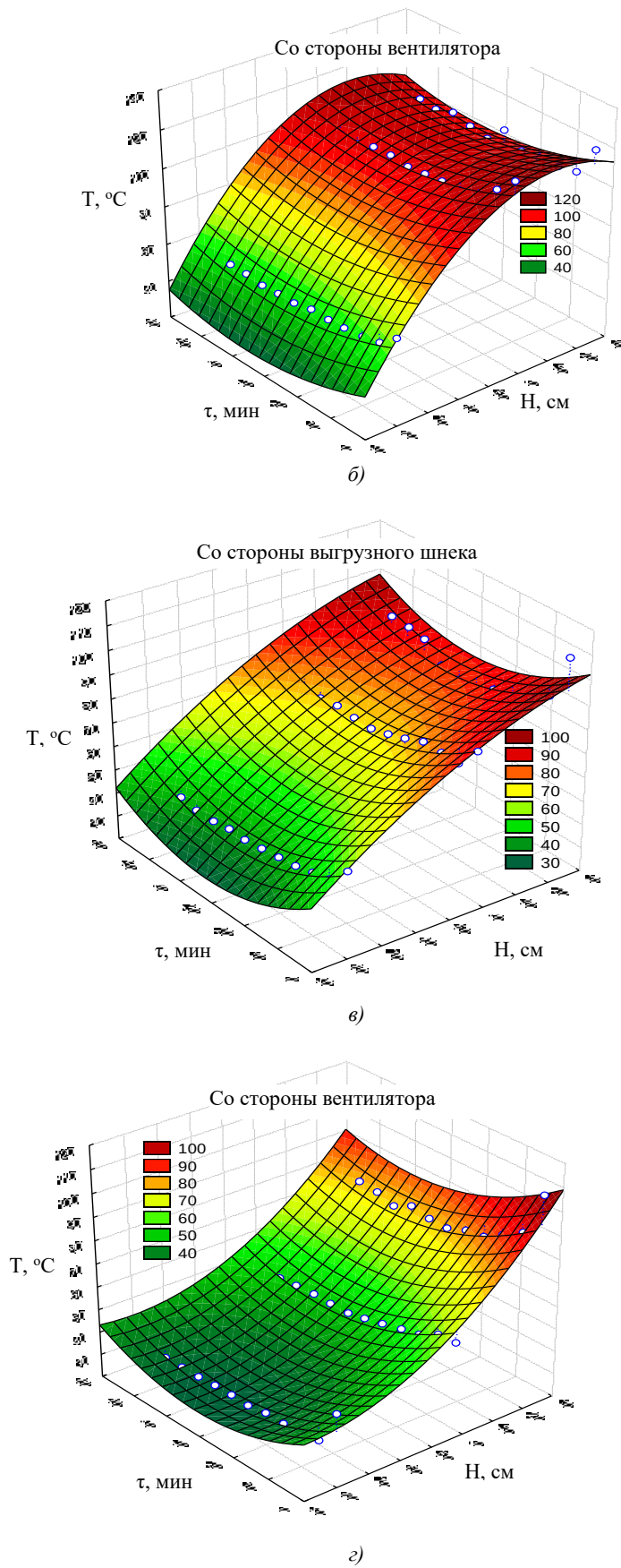


Рис. 4. Поверхность отклика функции $T = f(H, \tau)$ подвижного слоя ракушки четырех зон области измерения: а — правая сторона блока конвективной обработки; б — левая сторона блока конвективной обработки; в — правая сторона блока конвективной обработки; г — левая сторона блока конвективной обработки

С увеличением продолжительности выгрузки τ и высоты подвижного слоя H материала температуры его нагрева по зонам измерения.

В результате экспериментальных исследований процесса конвективного нагрева фуражного зерна и ракушки было установлено, что с увеличением производительности температура зерна пшеницы и ракушки на выходе из блока конвективной обработки снижается (рис. 5) и описывается линейной зависимостью:

$$T_z = 117,7 - 0,05 \cdot Q_z,$$

$$T_p = 109,6 - 0,04 \cdot Q_p,$$

где T_z , T_p — температура зерна и ракушки на выходе из блока конвективной обработки, °C; Q_z , Q_p — производительность по зерну и ракушке, кг/ч.

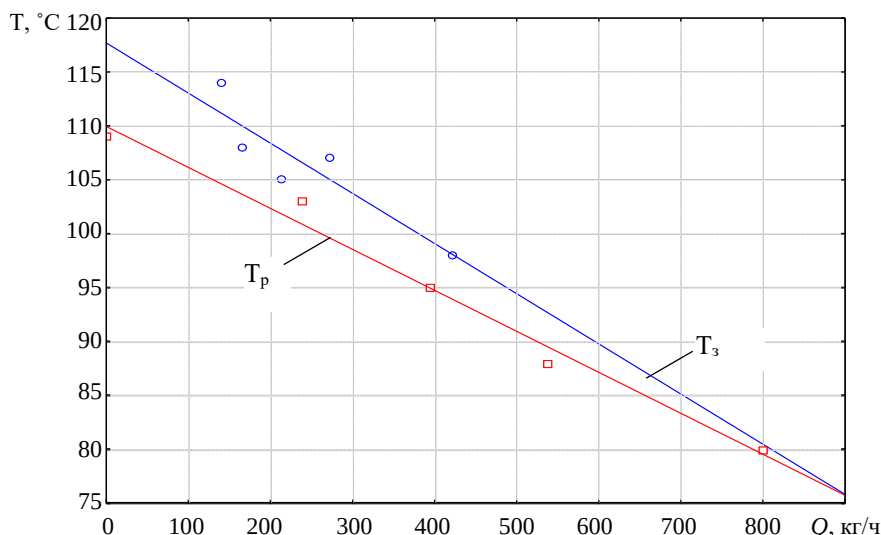


Рис. 5. Изменение температуры нагрева материала на выходе из блока конвективной обработки.

Анализ рис. 5 показывает, что для поддержания требуемой температуры зерна на выходе из блока конвективной обработки в пределах 95–105 °C его производительность должна составлять порядка 300–500 кг/ч. Для поддержания требуемой температуры ракушки (порядка 60–80 °C) производительность блока должна составлять свыше 650 кг/ч.

Результаты исследований влияния величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем на производительность блока конвективной обработки приведены на рис. 6.

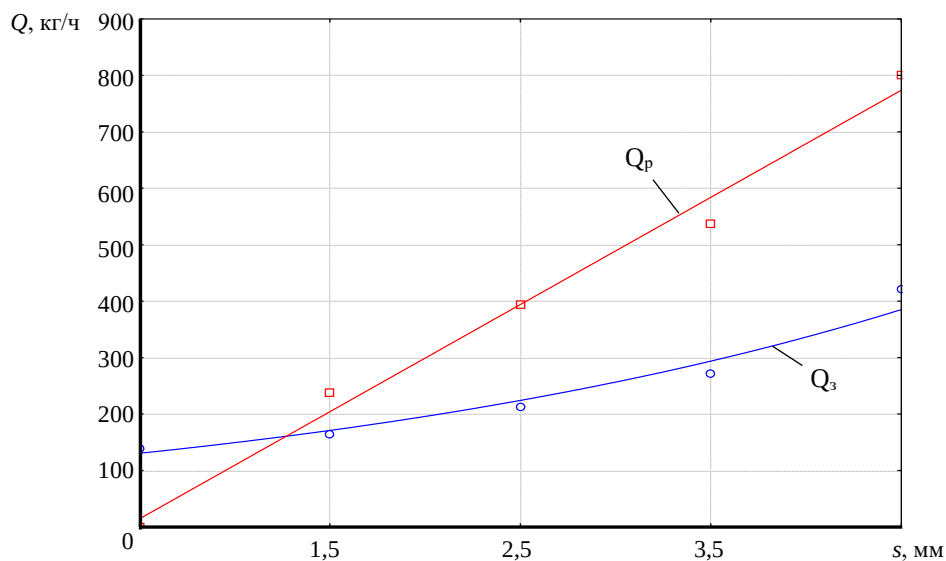


Рис. 6. Изменение производительности блока конвективной обработки от величины зазора

Анализируя их, можно отметить, что с увеличением зазора между дозирующей катушкой и отсекателем до 4,5 мм производительность блока увеличивается для зерна пшеницы до 400 кг/ч, для ракушки до 800 кг/ч. зависимость производительности блока конвективной обработки зерна пшеницы и ракушки определяется следующим выражением:

$$Q_z = 99,5 \cdot e^{0,27 \cdot s},$$

$$Q_p = -175,7 + 189,9 \cdot s,$$

где Q_z , Q_p — производительность блока конвективной обработки по зерну и ракушке, кг/ч; s — величина зазора между дозирующей катушкой и отсекателем, мм.

Исследованиями установлено, что зависимость удельных затрат энергии блока конвективной обработки от величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем (рис. 7) для зерна пшеницы и ракушки аппроксимируется экспоненциальной функцией вида:

$$E_{удз} = 0,34 \cdot e^{(-0,24 \cdot s)},$$

$$E_{удр} = 0,40 \cdot e^{(-0,36 \cdot s)},$$

где $E_{удз}$, $E_{удр}$ — удельные затраты энергии на обработку зерна и ракушки, кВт·ч/кг; s — величина зазора между дозирующей катушкой и отсекателем, мм.

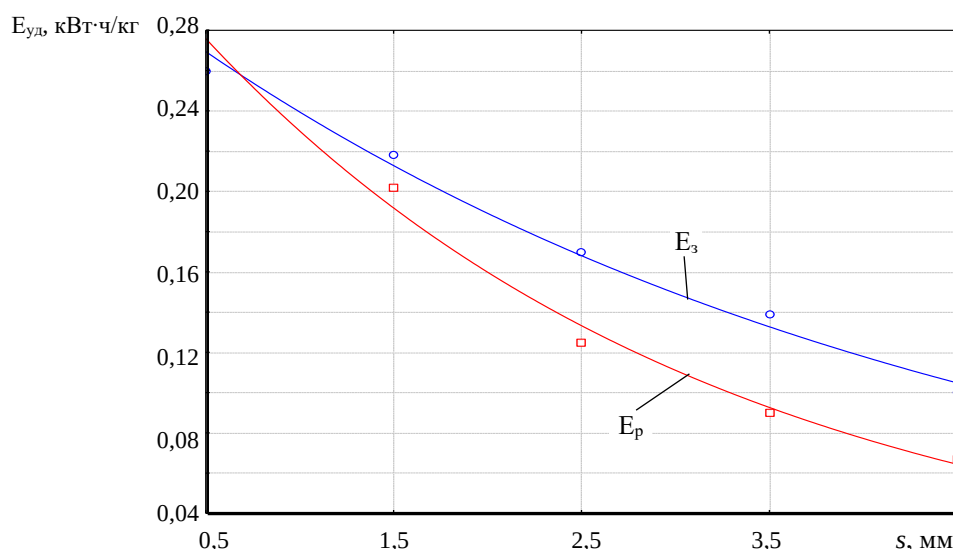


Рис. 7. Изменение удельных затрат энергии блока конвективной обработки от величины зазора

Из графика следует, что с увеличением величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем до 4,5 мм происходит снижение удельных затрат энергии на конвективную обработку зерна в 2,0–2,5 раза, ракушки — в 3,0–3,5 раза.

Так, при производительности блока конвективной обработки по зерну 400 кг/ч, зазор между дозирующей катушкой и отсекателем составляет 4,5 мм, а удельные затраты энергии составляют 0,1 кВт·ч/кг. При требуемой производительности блока по ракушке 650 кг/ч, зазор между дозирующей катушкой и отсекателем составляет 4,0 мм, а удельные затраты энергии — 0,07 кВт·ч/кг.

Проведенный этап исследований позволил определить основные зависимости и установить область существования конструктивно-технологических параметров процесса предварительного конвективного нагрева технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов.

По результатам исследований была доработана конструкторская документация технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева производительностью до 400 кг/ч

Обсуждение и заключение. Проведенный этап исследований позволил определить основные зависимости и установить область существования конструктивно-технологических параметров процесса предварительного конвективного нагрева технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов.

По результатам исследований была доработана конструкторская документация технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева производительностью до 400 кг/ч.

Список литературы/References

1. Коваленко А., Солдатенко Н., Фетисов Л., Сухих Е. Микотоксикологический мониторинг кормов в Северо-Кавказском регионе. *Комбикорма*. 2003;11:98–99. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/3_11/3-11_98-99.pdf (дата обращения: 02.05.2026).
2. Cristóbal Valverde, Margarita-Manuela Rodríguez-García, Esther Rojas, Rocío Bayón. State of the art of the fundamental aspects in the concept of microwave-assisted heating systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024;156:107594 <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107594>
3. Mohammad U.H. Joardder, Abdul Mojid Parvej, Md. Fahim Shahriar, Md. Fahim Faysal, Md. Mostafizur Rahman, Azharul Karim. Enhancing fish drying efficiency and quality: A comparative study of intermittent microwave convective drying (IMCD) and conventional methods. *Future Foods* 2025;12:100717 <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100717>
4. Vasilyev AA, Vasilyev AN, Budnikov D. Using Modeling to Select the Type of Microwave Field Emitter for Dense-Layer Grain Dryers. *Applied Sciences* 2023;13(16):9070. <https://doi.org/10.3390/app13169070>
5. Sining Mao, Yuhan Zhou, Bin Song, Yuzhu Wu, Yu Wang, Yiran Wang, Yanjia Liu, Xiuying Xu, Chengbin Zhao, Jingsheng Liu. Effect of Microwave Intermittent Drying on the Structural and Functional Properties of Zein in Corn Kernels. *Foods*. 2024;13(2):207. <https://doi.org/10.3390/foods13020207>
6. Jalal Dehghannya, Mahdi Habibi-Ghods. Computer simulation of microwave-assisted drying: Coupled influence of microwave power and pulse ratio on product and process characteristics. *Curr Res Food Sci*. 2025;10:101013. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101013>

Об авторе:

Дмитрий Андреевич Максак, инженер Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 14).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Dmitry A. Maksak, Engineer, Agricultural Research Center "Donskoy" (14 Lenina St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russian Federation)

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию/Received 12.05.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 26.05.2026

Принята к публикации/Accepted 10.06.2026

ЭКОЛОГИЯ

ECOLOGY



УДК 681.51:66.047

Оригинальное эмпирическое исследование

Лесные городские экосистемы Донбасса в условиях изменяющегося климата

Реуцкая В.В. , Шкиренко А.О. , Антропова Л.П. , Джантимирова А.А. ,
Корниенко В.О. ✉,

Донецкий государственный университет, Донецк, Российская Федерация

✉ kornienkovo@mail.ru

Аннотация

Введение. Совокупное влияние техногенных и климатических стрессоров привело городские лесные экосистемы Донбасса к критическому состоянию. Интенсивное промышленное развитие региона и глобальные климатические сдвиги вызывают физиологические нарушения у древесных растений, проявляющиеся в снижении их жизнеспособности и продуктивности. Донбасс характеризуется высоким уровнем загрязнения атмосферы, деградацией почв и изменениями климата, усугубляет уязвимость древесных насаждений, ослабленных техногенной нагрузкой, и ведёт к их преждевременному усыханию и снижению средообразующих функций. Цель исследования — эколого-биологическая оценка состояния древесных растений г. Донецка в условиях техногенеза и изменяющегося климата.

Материалы и методы. Исследования проводились в центральной части г. Донецка на древесных растениях, произрастающих вдоль автомагистралей. Объектами исследования выступили *Tilia cordata* Mill., *Acer platanooides* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Acer saccharinum* L., *Acer saccharum* Marshall, *Populus nigra* L., *Populus bolleana* Lauche, *Populus simonii* Carrière, *Robinia pseudoacacia* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall, *Betula pendula* Roth., *Ulmus laevis* Pall., *Ulmus pumila* L., *Ulmus glabra* Huds., *Syringa vulgaris* L., *Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers. Жизнеспособность оценивали по шкале В. А. Алексеева, проводили лесотаксационные и биофизические исследования. Фотосинтетический аппарат изучали с помощью флуориметра «Hexagon–imaging–PAM», регистрируя параметры флуоресценции.

Результаты исследования. Результаты исследования демонстрируют критическое состояние древесных насаждений в г. Донецке под совокупным воздействием техногенных и климатических стрессоров. Выявлены повреждения стволов, морозобоины и нарушение фотосинтетической активности — эти показатели свидетельствуют о снижении устойчивости и жизнеспособности деревьев. Особую обеспокоенность вызывает тенденция к переходу значительной части насаждений в аварийно опасное состояние.

Обсуждение и заключение. Снижение устойчивости и жизнеспособности деревьев ставит под угрозу экологические и средообразующие функции городских лесных экосистем. Полученные данные имеют высокую теоретическую и практическую значимость для понимания механизмов адаптации и деградации древесных растений в условиях антропогенно изменённой среды. Перспективы исследования включают разработку рекомендаций по подбору устойчивых видов, оптимизации режимов ухода и формированию новых насаждений, способных противостоять комплексному воздействию стрессовых факторов в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: Донбасс, лесные экосистемы, деревья, экология промышленного города, антропогенный прессинг, бelligеративные ландшафты

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Донецкого государственного университета «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно– трансформированных экосистем Донбасса» (FRRE– 2024– 0018).

Для цитирования. Реуцкая В.В., Шкиренко А.О., Антропова Л.П., Джантимирова А.А., Корниенко В.О. Лесные городские экосистемы Донбасса в условиях изменяющегося климата. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):73–82.

Forest Urban Ecosystems of Donbass in a Changing Climate

Valeriya V. Reutskaya , Alyona O. Shkirenko , Liliya .P. Antropova , Alexandra A. Dzhanimirova ,
Vladimir O. Kornienko  

Donetsk State University, Donetsk, Russian Federation

 kornienkovo@mail.ru

Abstract

Introduction. The combined impact of anthropogenic and climatic stressors has brought the urban forest ecosystems of Donbass to a critical state. The region's intensive industrial development and global climate shifts lead to physiological disturbances in woody plants, manifesting as reduced viability and productivity. Donbass is characterised by high levels of atmospheric pollution, soil degradation, and climate change. These factors exacerbate the vulnerability of tree stands already weakened by anthropogenic pressure, leading to premature dieback and a decline in their environmental functions. The aim of the study is to assess the ecological and biological condition of woody plants in Donetsk under conditions of anthropogenic impact and a changing climate.

Materials and Methods. The research was carried out in the central part of Donetsk, focusing on woody plants growing along busy highways. The study objects included *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Acer saccharinum* L., *Acer saccharum* Marshall, *Populus nigra* L., *Populus bolleana* Lauche, *Populus simonii* Carrière, *Robinia pseudoacacia* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall, *Betula pendula* Roth., *Ulmus laevis* Pall., *Ulmus pumila* L., *Ulmus glabra* Huds., *Syringa vulgaris* L., and *Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers. Viability was assessed using V. A. Alekseev's scale, and forest inventory and biophysical studies were also conducted. The photosynthetic apparatus was examined with a Hexagon-imaging-PAM fluorimeter, with fluorescence parameters being recorded.

Research Results. The results demonstrate the critical condition of tree stands in Donetsk under the combined influence of anthropogenic and climatic stressors. Trunk damage, frost cracks, and impaired photosynthetic activity were identified — these indicators point to a reduction in the trees' stability and viability. Of particular concern is the trend towards a significant proportion of the stands transitioning into a hazardous condition.

Discussion and Conclusion. The reduced stability and viability of the trees threaten the ecological and environmental-forming functions of urban forest ecosystems. The data obtained are of considerable theoretical and practical significance for understanding the mechanisms of adaptation and degradation of woody plants in an anthropogenically altered environment. The prospects for the research include developing recommendations for selecting resistant species and varieties, optimising maintenance regimes, and establishing new plantings capable of withstanding the combined impact of stress factors under a changing climate.

Keywords: Donbass, forest ecosystems, trees, ecology of an industrial city, anthropogenic pressure, war-affected landscapes

Funding. The study was carried out within the framework of the state assignment of Donetsk State University “Diagnostics and Mechanisms of Adaptation of Natural and Anthropogenically Transformed Ecosystems of Donbas” (FRRE–2024–0018).

For citation. Reutskaya VV, Shkirenko AO, Antropova LP, Dzhanimirova AA, Kornienko VO. Forest Urban Ecosystems of Donbass in a Changing Climate. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):73–81.

Введение. В условиях стремительного развития техногенного воздействия и глобальных климатических перемен, вопросы устойчивости и адаптации природных и природно-антропогенных биосистем приобретают особую актуальность. Особое значение в урбанизированных зонах имеют лесные экосистемы, которые играют ключевую роль в поддержании экологического баланса [1–4]. Они способствуют улучшению качества окружающей среды, регулируют микроклимат, очищают воздух и повышают уровень комфорта городской жизни населения [3, 4]. Однако длительное воздействие антропогенных факторов в сочетании с изменениями климата оказывает существенное негативное влияние на древесные растения. Это проявляется в нарушении ростовых процессов, ускоренном старении, снижении функциональной активности ассимиляционного аппарата, общей жизнеспособности и репродуктивных способностей под воздействием стрессоров [1–4].

Донбасс характеризуется экстремально высоким уровнем техногенной нагрузки, накопленной за последние полтора десятилетия интенсивной деятельности угледобывающей, металлургической и коксохимической промышленности. Экологические проблемы региона имеют многолетний и комплексный характер [4–12]. Среди них — деградация земель вследствие горных выработок, нарушение структуры почвенного покрова, загрязнение атмосферы

тяжелыми металлами, диоксидом серы и оксидами азота, а также загрязнение поверхностных вод, ставшее неотъемлемым фактором среды [6–9]. Почвы урбанизированных территорий Донбасса в значительной степени трансформированы под воздействием техногенных факторов [12]. Приземные слои атмосферы крупных городов региона, таких как Донецк, Макеевка, Луганск и Горловка, насыщены повышенными концентрациями оксидов азота, углерода и пыли, которая оседает на ассимиляционных органах растений [4, 6].

К существующему комплексу негативных факторов добавились новые, ранее не характерные для данной территории [13]. Изменение климата на юге России, включая Донбасс, проявляется в устойчивом росте среднегодовых температур [14]. Темпы потепления в 1,5–2 раза превышают среднемировые, что сопровождается увеличением частоты и продолжительности засушливых периодов в весенне-летний сезон [4–5, 10]. За последние два десятилетия среднегодовая температура воздуха в Донбассе поднялась на 1,2–1,5°C по сравнению с климатической нормой середины XX века [14]. Особую тревогу вызывают изменения режима увлажнения: количество осадков в вегетационный период сократилось на 10–15%, при этом участились случаи выпадения осадков, недостаточных для эффективного промачивания почвы [5]. Интенсификация экстремальных погодных явлений, таких как засухи, суховеи, ураганные ветры и аномальные осадки, усугубляет существующий техногенный прессинг, создавая качественно новую и крайне неблагоприятную экологическую ситуацию [2–5, 10, 11, 13].

Сочетанное воздействие техногенных и климатических стрессоров приводит к ускоренной деградации городских лесных насаждений. Устойчивость древесных растений, ослабленных токсическим воздействием, дополнительно снижается из-за дефицита влаги и повышенных температур. Наиболее уязвимыми оказываются виды с поверхностной корневой системой и повышенной требовательностью к влажности воздуха [9]. Все чаще наблюдаются случаи преждевременного усыхания крон, патологического листопада в середине вегетационного периода, а также массового поражения ослабленных деревьев стволовыми вредителями [2–3]. Городские насаждения теряют способность к естественному возобновлению, что негативно сказывается на их санитарно-гигиенической и эстетической ценности. В результате ослабленные насаждения утрачивают свою способность эффективно улучшать качество городской среды, что усугубляет экологическую обстановку и повышает риски для здоровья населения [13, 14].

Таким образом, актуальность исследования лесных городских экосистем Донбасса в условиях меняющегося климата обусловлена критическим снижением их устойчивости и продуктивности под комплексным воздействием техногенных и климатических стрессоров. Необходимо выявить закономерности реакций древесных растений на комплексное воздействие факторов среды, определить пороговые значения устойчивости основных лесообразующих пород и разработать научно обоснованные рекомендации по формированию устойчивых городских насаждений в новых климатических реалиях.

Цель работы – эколого-биологическая оценка древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения и климатических изменений в городе Донецке.

Материалы и методы. Мониторинговые исследования проводились в центральной части г. Донецка, которая характеризуется высокой степенью техногенной нагрузки и отличается повышенным уровнем загрязнения воздушной среды выбросами автотранспорта. В качестве объектов исследования выступали древесные растения различных возрастных групп, произрастающие в первом ряду вдоль автомагистралей с интенсивным движением (рис. 1).



Рис. 1. Древесные растения, произрастающие вдоль автомагистралей

Объектами послужили виды, составляющие основу уличных насаждений города: *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Acer saccharinum* L., *Acer saccharum* Marshall, *Populus nigra* L., *Populus bolleana* Lauche, *Populus simonii* Carrière, *Robinia pseudoacacia* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall, *Betula pendula* Roth., *Ulmus laevis* Pall., *Ulmus pumila* L., *Ulmus glabra* Huds., *Syringa vulgaris* L., *Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers.

Для оценки состояния растений проводился комплекс полевых, лабораторно–инструментальных и камеральных работ. Полевой этап включал геоботаническое описание, визуальную оценку и инструментальные измерения. Жизнеспособность деревьев определяли по интегральной шкале В.А. Алексеева [15].

Диаметр ствола измеряли мерной вилкой Haglöf Mantax (Швеция). Высоту деревьев и параметры архитектуры кроны определяли методом цифровой обработки фотоснимков в программе AxioVision Rel. 4.8

Для определения влияния техногенной нагрузки на фотосинтетический аппарат древесных растений выполнялся отбор листовых пластинок с нижней части кроны, в первой половине дня с целью минимизации влияния суточных ритмов на физиологические показатели. Перед инструментальными измерениями листовые пластинки выдерживались в условиях темноты в течение 20–30 минут для стабилизации реакционных центров фотосистемы 2. Количество собранных образцов с каждого дерева составило не менее 30 штук.

Регистрацию флуоресцентных параметров выполняли с помощью импульсного флуориметра «HEXAGON–IMAGING–PAM» (Heinz Walz, Германия) (рис. 2).



Рис. 2. Импульсный флуориметр «HEXAGON–IMAGING–PAM»

Для изучения кинетики изменений амплитуды флуоресценции хлорофилла применяли протокол, предусматривающий подачу 15 насыщающих световых вспышек мощностью 4000 мкмоль квантов $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ каждая. Между импульсами выдерживали паузу в 40 секунд, в течение которой образец облучали слабым измерительным светом интенсивностью 21 мкмоль фотонов $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Световые кривые флуоресценции получали при ступенчатом увеличении интенсивности измерительного света от 0 до 701 мкмоль фотонов $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (всего 13 этапов). Показатели фиксировали по завершении каждого этапа, продолжительностью 20 секунд.

В ходе исследования получали следующие параметры:

$Y(II) = \frac{F_m' - F}{F_m'}$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II;

$Y(NPQ) = 1 - Y(II) - \frac{1}{NPQ + 1 + qL \left(\frac{F_m}{F_0} - 1 \right)}$ – квантовый выход регулируемой диссипации энергии в фотосистеме II;

$Y(NO) = \frac{1}{NPQ + 1 + qL \left(\frac{F_m}{F_0} - 1 \right)}$ – квантовый выход нерегулируемого рассеяния энергии в фотосистеме II;

$NPQ = \frac{F_m}{F_m'} - 1$ – уровень нефотохимического тушения флуоресценции;

$qN = 1 - \frac{F_m' - F_0'}{F_m - F_0} = 1 - \frac{F_v'}{F_v}$ – коэффициент нефотохимического тушения;

$qP = \frac{F_m' - F}{F_m' - F_0'}$ – коэффициент фотохимического тушения;

$qL = \frac{F_m' - F}{F_m' - F_0'} \cdot \frac{F_0'}{F} = qP \cdot \frac{F_0'}{F}$ – коэффициент фотохимического тушения, являющийся показателем доли откры-

тых реакционных центров фотосистемы II;

$ETR = 0.5 \cdot Y(II) \cdot PAR \cdot 0.84$ [мкэкв. $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$] – скорость фотосинтетического электронного транспорта.

Статистический анализ результатов проводили с использованием пакета Microsoft Excel LTSC (версия 2505, сборка 16.0.18827.20102, Microsoft Corporation).

Результаты исследования. В составе линейных насаждений обследованных улиц выявлено 45 видов деревьев. Из них 13 видов являются представителями аборигенной флоры, относящимися к 24 родам и 17 семействам. Доминирующее положение в ассортименте занимают: *Populus bolleana* Lauche, *Acer platanoides* L., *Betula pendula* Roth, *Acer pseudoplatanus* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Aesculus hippocastanum* L. и *Picea pungens* Engelm. Анализ происхождения видов показал преобладание представителей европейской (48,85 %), североамериканской (22,49 %) и среднеазиатской (18,02 %) флор.

Наиболее многочисленной возрастной группой среди обследованных деревьев является группа в возрасте 40–49 лет. Это совпадает с данными исследований, указывающими на то, что именно по достижении 40–50-летнего возраста большинство видов древесных растений в условиях урбанизированной среды Донбасса начинают проявлять признаки снижения жизнеспособности. В этот критический период естественные возрастные изменения усугубляются хроническим техногенным стрессом. Это приводит к заметным нарушениям в архитектонике кроны и целостности ствола деревьев. На обследованных участках были зафиксированы морфологические повреждения, которые коррелируют с преобладающим возрастным классом насаждений (рис. 3).



Рис. 3. Патологические признаки обследованных деревьев: а — наклон ствола, б — отслоение коры, в — сухобокость, г — морозобоины, д — прорость, е — наросты, ж — гниль, з — суховершинность, и — асимметрия кроны

Патологические изменения ствола (рак, гнилостные процессы, обломы, зарубы) приводят к снижению механической прочности древесины и устойчивости дерева к ветровым и гравитационным нагрузкам, что переводит его в категорию аварийных. Наиболее подвержены кронированию и санитарной обрезке *Ulmus laevis* Pall., *Ulmus glabra* Huds., *Ulmus pumila* L. и *Robinia pseudoacacia* L. Эти растения входили в возрастную группу 50–55 лет (43,5% от общей выборки), достигнув критического для региона возраста. Вследствие участвовавших ветровалов такие деревья подвержены обломам скелетных ветвей и стволов, а также вывалам с комлем, что создаёт угрозу для городской инфраструктуры и безопасности жителей (рис. 4).



Рис. 4. Последствия действия ветровала на ослабленное дерево рядом с транспортной инфраструктурой

Исследование световых кривых (рис. 5) показал, что *U. pumila* имеет наибольшее содержание хлорофилла а и эффективный квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$), что указывает на высокую фотосинтетическую активность, несмотря на повреждения и большое развитие гнилостных процессов. Вяз также имел максимальный коэффициент фотохимического тушения (qP) и скорость электронного транспорта (ETR), а также повышенный уровень нефотохимического тушения NPQ , что предполагает адаптированную систему фотозащиты.

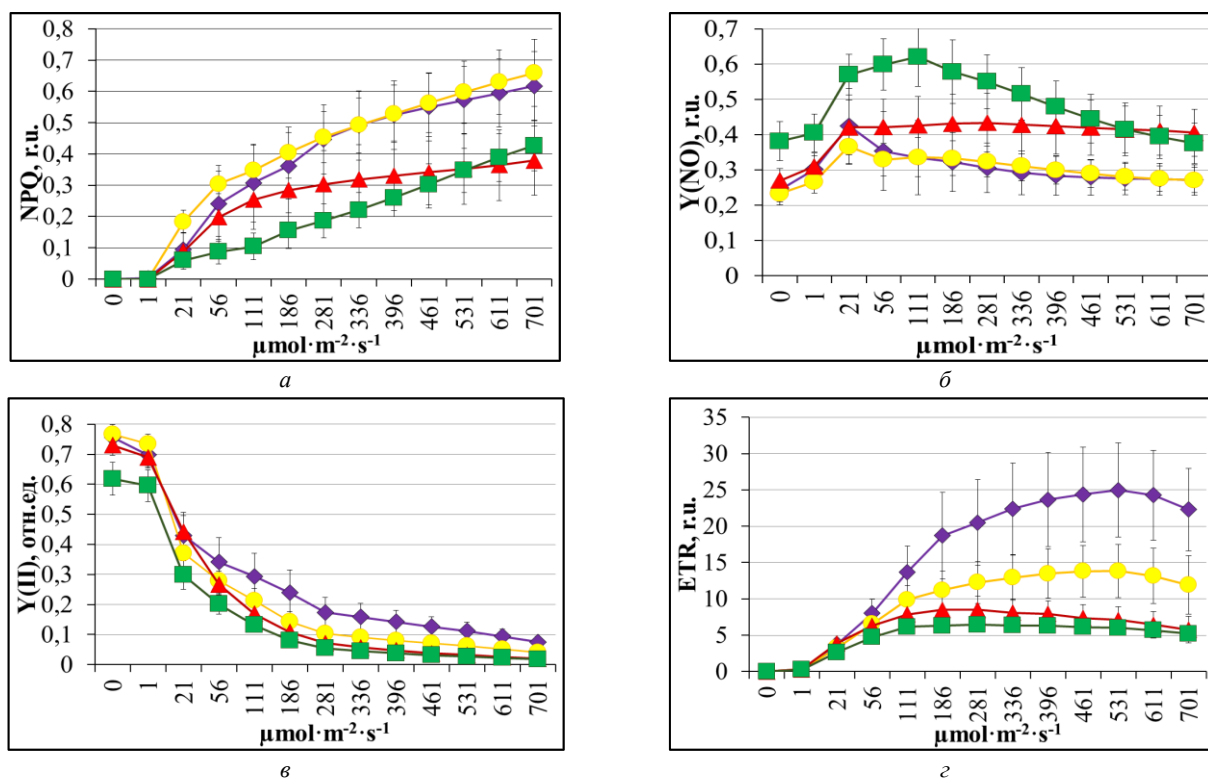


Рис. 5. Изменения параметров световых кривых флуоресценции древесных растений на модельном участке: а — уровень нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ), б — квантовый выход нерегулируемого рассеяния энергии в фотосистеме II ($Y(NO)$), в — эффективный фотохимический квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$), г — скорость фотосинтетического электронного транспорта (ETR)

S. intermedia и *T. cordata* демонстрировали промежуточные значения $Y(II)$. Липа показала минимальное содержание хлорофилла а и наименьшее значение $Y(NO)$, что указывает на устойчивость растений в стрессовым-факторам. Рябина и липа, как и вяз, демонстрировали увеличение нефотохимического тушения NPQ, способствующее фотозащите.

Следует отметить, что клёны демонстрируют высокую декоративную функцию вдоль автомагистралей, которая сохраняется до появления симптомов хлороза. Так, на листьях отмечен краевой хлороз. Это повреждение обычно связано с воздействием повышенной температуры и выхлопных газов, т.е. является следствием ожога листьев. Загрязнение препятствует нормальному поглощению питательных веществ, например, недостаток железа вызывает хлороз листьев (т.е. потерю зеленого пигмента).

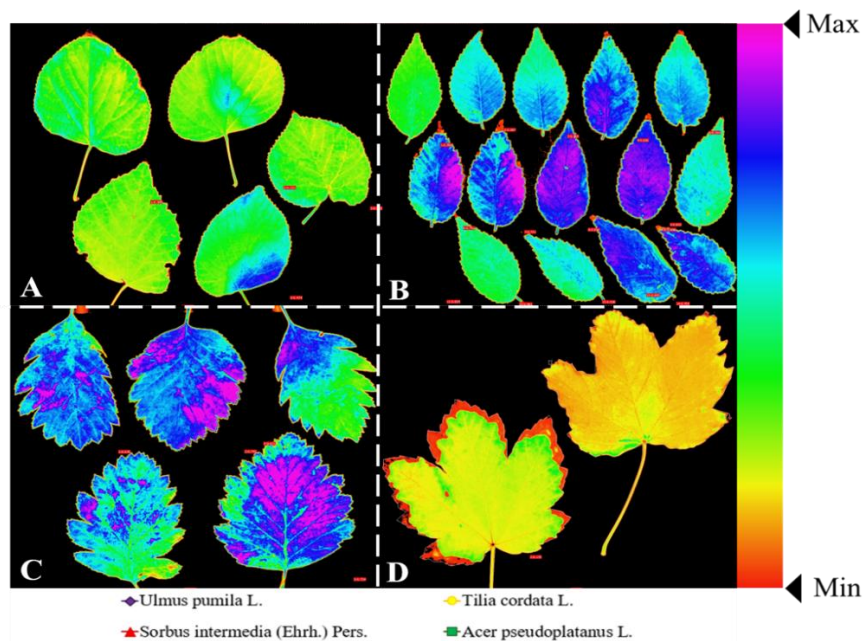


Рис. 6. Фотосинтетическая активность древесных растений

По исследованиям световых кривых *A. pseudoplatanus* имел наименьший эффективный квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$) и высокий уровень неконтролируемого рассеивания энергии ($Y(NO)$), что свидетельствует о снижении эффективности фотосинтеза. У него также отмечены наименьшие значения нефотохимического тушения (NPQ), что говорит о слабой фотозащите. Явор несмотря на хорошую пылеулавливающую функцию является менее устойчивым к стрессу-факторам.

Обсуждение и заключение. В обследованной городской лесной экосистеме Донецка выявлено 45 видов деревьев, в том числе 13 видов аборигенной фракции флоры, относящихся к 24 родам и 17 семействам. Доминантными являются *P. bolleana*, *A. platanoides*, *B. pendula*, *A. pseudoplatanus*, *R. pseudoacacia*, *A. hippocastanum* и *P. pungens*. В насаждениях преобладают виды европейского (48,85%), североамериканского (22,49%) и среднеазиатского (18,02%) происхождения.

Анализ жизнеспособности деревьев выявил критическое снижение устойчивости насаждений. В возрастной категории 31–40 лет от 40% до 50% деревьев имеют повреждения стволов различного происхождения. Среди старовозрастных растений (50–55 лет), составляющих 43,5% выборки, доля особей с трещинами достигает 41–42% (*R. pseudoacacia* и *P. bolleana*), а уровень развития морозобоин у *P. bolleana* составляет 47%. Эти показатели подтверждают, что значительная часть насаждений переходит в категорию «аварийное состояние».

Установлено, что комплексное воздействие погодных стрессоров и загрязнения воздуха приводит к повреждениям тканей у обследованных растений в средневозрастной группе. Влияние климатических аномалий подтверждается наличием морозобоин у 40% молодых экземпляров *S. intermedia*. Антропогенные факторы приводят к нарушению фотосинтетической активности и возникновению краевого хлороза у ряда видов, что свидетельствует о высоком уровне техногенной нагрузки в городской экосистеме.

Список литературы/References

1. Чибилёв А.А., Кишкань Р.В., Корниенко В.О., Вельмовский П.В., Садертдинов Р.Р., Шкиренко А.О. Оценка состояния старовозрастных лесных насаждений Донбасса и Новороссии. *Наука Юга России*. 2026;22(2):91–99. <http://doi.org/10.7868/S25000640260212>

Chibilev AA, Kishkan RV, Kornienko VO, Velmovsky PV, Sadertdinov RR, Shkirenko AO. Assessment of the condition of old-growth forest stands in Donbass and Novorossiia. *Science of the South of Russia*. 2026;22(2):91–99. <http://doi.org/10.7868/S25000640260212>

2. Корниенко В.О., Шкиренко А.О., Реуцкая В.В., Яицкий А.С., Джантимирова А.А. Анализ уязвимости древесных растений, произрастающих в условиях урбоэкосистем (на примере города Донецка). *Самарский научный вестник*. 2025;14(2):19–29. <http://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-8-54-62>

Kornienko VO, Shkirenko AO, Reutskaya VV, Yaitsky AS, Dzhanhimirova AA. Analysis of the vulnerability of woody plants growing in urban ecosystems (using the city of Donetsk as a case study). *Samara Scientific Bulletin*. 2025;14(2):19–29. <http://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-8-54-62>

3. Корниенко В. О., Джантимирова А.А., Яицкий А.С. Оценка устойчивости деревьев *Tilia cordata* Mill. в условиях урбанизированной среды г. Донецка. *Самарский научный вестник*. 2026;15(2):66–74. <http://doi.org/10.55355/snv2026152108>

Kornienko VO, Dzhanhimirova AA, Yaitsky AS. Assessment of the stability of *Tilia cordata* Mill. trees in the urbanized environment of Donetsk. *Samara Scientific Bulletin*. 2026;15(2):66–74. <http://doi.org/10.55355/snv2026152108>

4. Сафонов А.И. Экологический фитомониторинг антропогенных трансформаций: монография. Донецк: Издательский дом «Эдит», 2024. 289 с.

Safonov AI. Ecological phytomonitoring of anthropogenic transformations: a monograph. Donetsk: "Edit" Publishing House, 2024. 289 p.

5. Гермонова Е.А., Сафонов А.И. Прогнозный сценарий фактора полемостресса в Донбассе на основании фитомониторинга. *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. 2025;2:21–29. <http://doi.org/10.5281/zenodo.15082154>

Germonova EA, Safonov AI. Predictive scenario regarding the polemostress factor in Donbass based on phytomonitoring. *Problems of Ecology and Nature Conservation in an Industrial Region*. 2025;2:21–29. <http://doi.org/10.5281/zenodo.15082154>

6. Chufitskiy S, Romanchuk S, Meskhi B, Olshevskaya A, Shevchenko V, Odabashyan M, Teplyakova S, Vershinina A, Savenkov D. Assessment of surface water quality in the Krynka river basin using fluorescence spectroscopy methods. *Plants*. 2025;14(13). <http://doi.org/10.3390/plants14132014>

7. Чуфицкий С.В., Беспалова С.В., Романчук С.М., Аникина Е.А. Оценка качества поверхностных вод реки крынка с применением методов биотестирования и флуориметрии. *Самарский научный вестник*. 2026;15(1):53–60. <http://doi.org/10.55355/snv2024131109>

Chufitskiy SV, Bepalova SV, Romanchuk SM, Anikina EA. Assessment of surface water quality in the Krynka River using biotesting and fluorimetry methods. *Samara Scientific Bulletin*. 2026;15(1):53–60. <http://doi.org/10.55355/snv2024131109>

8. Bepalova SV, Romanchuk SM, Chufitskiy SV, Perebeinos VV, Gotin BA. Fluorimetric Analysis of the Impact of Coal Sludge Pollution on Phytoplankton. *Biophysics*. 2020;65:850–857. <http://doi.org/10.1134/S0006350920050024>

9. Chufitskiy S, Meskhi B, Olshevskaya A, Shevchenko V, Odabashyan M, Kozyrev D, Mirzoyan A, Vershinina A, Gukasyan L. Impact of Surface Water Pollution on Biodiversity and Photosynthetic Activity of Phytoplankton in the Kalmius River. *Diversity*. 2026;18(188). <https://doi.org/10.3390/d18030188>

10. Сафонов А.И., Неспирный В.Н. Экологический профиль библиографического ландшафта Донбасса. Часть 1. *Научные и технические библиотеки*. 2026;2:56–85. <https://doi.org/10.33186/1027-3689-2026-2-56-85>

Safonov AI, Nesporny VN. Ecological profile of the bibliographic landscape of Donbas. Part 1. *Scientific and Technical Libraries*. 2026;2:56–85. <https://doi.org/10.33186/1027-3689-2026-2-56-85>

11. Сафонов А.И., Неспирный В.Н. Экологический профиль библиографического ландшафта Донбасса. Часть 2. *Научные и технические библиотеки*. 2026;3:67–94. <https://doi.org/10.33186/1027-3689-2026-3-67-94>

Safonov AI, Nesporny VN. Ecological profile of the bibliographic landscape of Donbas. Part 2. *Scientific and Technical Libraries*. 2026;3:67–94. <https://doi.org/10.33186/1027-3689-2026-3-67-94>

12. Галактионова Е.В., Сафонов А.И. Детализация метода фитотестирования загрязненных почв по уязвимости апикальных меристем. *Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки*. 2025;1:94–100. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14923403>

Galaktionova EV, Safonov AI. Refinement of the phytotesting method for contaminated soils based on apical meristem vulnerability. *Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences*. 2025;1:94–100.

13. Кишкань Р.В., Выборов С.Г., Завальнюк Н.В., Кирбаба В.В. и др. *Белая книга Донбасса и Новороссии. Природа исторических регионов в огне войны: что произошло и как это изменить в лучшую сторону*: иллюстрированная монография. Под общ. редакцией А.А. Чибилёва, С.Н. Калмыкова, Р.В. Кишканя. Москва: ВАШ ФОРМАТ, 2026. 368 с.

Kishkan RV, Vyborov SG, Zavalnyuk NV, Kirbaba VV, et al. *White Paper on Donbas and Novorossiia: The Nature of Historical Regions in the Flames of War—What Happened and How to Change It for the Better: Illustrated Monograph*. Eds. A.A. Chibilev, S.N. Kalmykov, R.V. Kishkan. Moscow: VASH FORMAT, 2026. 368 p.

14. Барановский А.В., Курдюкова О.Н. Анализ динамики погодных условий Луганской области за последние 100 лет. *Вестник КрасГАУ*. 2021;8(173):54–62. <http://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-8-54-62>

Baranovsky AV, Kurdyukova ON. Analysis of weather condition dynamics in the Luhansk region over the last 100 years. *Bulletin of KrasGAU*. 2021;8(173):54–62. <http://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-8-54-62>

15. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. *Лесоведение*. 1989;4:51–57.

Alekseev V.A. Diagnosis of the vitality status of trees and forest stands. *Forest Science*. 1989;4:51–57.

Об авторах:

Реуцкая Валерия Вячеславовна, стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории мониторинга и прогнозирования экосистем Донбасса Донецкого государственного университета (283001, Российская Федерация, г. Донецк, ул. Университетская 24), [ORCID](#), reutskaya_valeria@mail.ru

Шкиренко Алёна Олеговна, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга и прогнозирования экосистем Донбасса Донецкого государственного университета (283001, Российская Федерация, г. Донецк, ул. Университетская 24), [ORCID](#), alyona.shkirenko@mail.ru

Антропова Лилия Павловна, стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории мониторинга и прогнозирования экосистем Донбасса Донецкого государственного университета (283001, Российская Федерация, г. Донецк, ул. Университетская 24), [ORCID](#), antropowalilya@yandex.ru

Джантимирова Александра Александровна, стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории мониторинга и прогнозирования экосистем Донбасса Донецкого государственного университета (283001, Российская Федерация, г. Донецк, ул. Университетская 24), [ORCID](#), a.djantimirova@mail.ru

Корниенко Владимир Олегович, кандидат биологических наук, заведующий научно-исследовательской частью, заведующий научно-исследовательской лаборатории мониторинга и прогнозирования экосистем Донбасса, доцент кафедры физиологии и биофизики Донецкого государственного университета (283001, Российская Федерация, г. Донецк, ул. Университетская 24), [ORCID](#), [ScopusID](#), kornienkovo@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Реуцкая: проведение полевых и камеральных исследований, проведение расчетов, подготовка текста.

А.О. Шкиренко: проведение полевых и камеральных исследований, проведение расчетов, подготовка текста.

Л.П. Антропова: проведение полевых и камеральных исследований, проведение расчетов, подготовка текста.

А.А. Джантимирова: проведение полевых и камеральных исследований, проведение расчетов, подготовка текста.

В.О. Корниенко: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Valeriya V. Reutskaya, Research Trainee, Research Laboratory for Monitoring and Forecasting Ecosystems of Donbas, Donetsk State University (24 Universitetskaya St., Donetsk, 283001, Russian Federation), [ORCID](#), reutskaya_valeria@mail.ru

Alyona O. Shkirenko, Junior Research Fellow, Research Laboratory for Monitoring and Forecasting Ecosystems of Donbas, Donetsk State University (24 Universitetskaya St., Donetsk, 283001, Russian Federation), [ORCID](#), alyona.shkirenko@mail.ru

Liliya P. Antropova, Research Trainee, Research Laboratory for Monitoring and Forecasting Ecosystems of Donbas, Donetsk State University (24 Universitetskaya St., Donetsk, 283001, Russian Federation), [ORCID](#), antropowalilya@yandex.ru

Alexandra A. Djantimirova, Research Trainee, Research Laboratory for Monitoring and Forecasting Ecosystems of Donbas, Donetsk State University (24 Universitetskaya St., Donetsk, 283001, Russian Federation), [ORCID](#), a.djantimirova@mail.ru

Vladimir O. Kornienko, Cand.Sci. (Biology), Head of the Research Department, Head of the Research Laboratory for Monitoring and Forecasting Ecosystems of Donbas, Associate Professor of the Department of Physiology and Biophysics, Donetsk State University (24 Universitetskaya St., Donetsk, 283001, Russian Federation), [ORCID](#), [ScopusID](#), kornienkovo@mail.ru

Claimed contributorship:

VV Reutskaya: conducting field and laboratory research, performing calculations, preparing the manuscript text.

AO Shkirenko: conducting field and laboratory research, performing calculations, preparing the manuscript text.

LP Antropova: conducting field and laboratory research, performing calculations, preparing the manuscript text.

AA Dzhantimirova: conducting field and laboratory research, performing calculations, preparing the manuscript text.

VO Kornienko: scientific supervision, formation of the core concept, goals and objectives of the research, analysis of research results, finalization of the text, adjustment of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 05.07.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 20.07.2026

Принята к публикации/Accepted 01.08.2026

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ELECTRICAL TECHNOLOGIES, ELECTRICAL EQUIPMENT AND POWER SUPPLY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX



УДК 681.51:66.047

Оригинальное эмпирическое исследование

Энерготехнологический критерий для управления резервом охлаждения молока при нарушении электроснабжения

Савенков Д.Н.¹ , Щербаков А.А.¹ , Мироненко А.А.¹ , Кобыляцкий П.С.² ¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация²Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Ростовская обл., Российская Федерация✉ savenkov-dstu@yandex.ru

Аннотация

Введение. Качество молочной продукции детерминировано совокупным влиянием энергетических параметров и временных факторов процесса охлаждения. Непосредственно после доения требуется оперативное снижение температуры сырья с последующим поддержанием заданного термического режима до этапа транспортировки либо переработки. Существующие методики энергетического расчёта, применяемые к молочным резервуарам, не отражают полной картины: необходимо принимать во внимание наличие пассивного теплового резерва, обусловленного конечной теплоёмкостью продукта и ограждающих конструкций, а также кинетику развития психротрофной микрофлоры. Исследования показывают, что время до охлаждения и скорость прохождения высокотемпературной зоны влияют на качество. Критерий должен быть динамическим и опираться на данные датчиков. Цель исследования — разработать энерготехнологический критерий, объединяющий тепловой, микробиологический и электрический резервы для принятия решений при нарушении электроснабжения.

Материалы и методы. Предложен энерготехнологический критерий для оценки резерва времени при нарушении электроснабжения молочного резервуара. Учитываются три составляющие: тепловой резерв (обусловленный инерцией нагрева продукта и ограждающих конструкций); микробиологический (определяемый динамикой роста микрофлоры с учётом исходной обсеменённости); энергетический (зависящий от ёмкости резервного источника питания и уровня критической нагрузки). Итоговый показатель сопоставляется с прогнозируемым сроком восстановления электроснабжения: при превышении прогнозного срока над расчётным резервом требуется аварийное реагирование. Параметризация модели предусматривает локальную идентификацию тепловых характеристик резервуара и калибровку микробиологических зависимостей на основании фактических данных.

Результаты исследования. Проведён анализ чувствительности температурного резерва к ключевым параметрам: установлено доминирующее влияние начальной и предельной температур, обусловленное узким технологическим интервалом. Показана возможность снижения требований к аккумуляторному накопителю за счёт увеличения пассивного теплового резерва. С учётом измерительной неопределённости предложен безопасный резерв на основе статистической оценки. Разработан безразмерный критерий для ранжирования зон технологического риска и формирования алгоритма управленческих решений. Верификация модели предусматривает поэтапные экспериментальные измерения тепловых, электрических и микробиологических параметров с последующей проверкой прогнозной точности.

Обсуждение и заключение. Критерий объединяет энергетические и технологические параметры, обеспечивая прозрачную оценку резерва. Приоритетные меры зависят от лимитирующего фактора — теплового, микробиологического или электрического. Показатель служит прогнозным индикатором между лабораторными анализами и применением для многокритериальной оптимизации затрат и рисков. Усложнение модели оправдано лишь при снижении ошибок на независимых данных; в остальных случаях предпочтительна консервативная простая модель.

Ключевые слова: охлаждение молока, нарушение электроснабжения, тепловая инерция, микробиологический риск; аккумуляторный накопитель, резерв времени, энерготехнологический критерий, АПК

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания 075-03-2025-302/1 (FZNE-2025-0002).

Для цитирования. Савенков Д.Н., Щербakov А.А., Мironenko А.А., Кобыляцкий П.С. Энерготехнологический критерий для управления резервом охлаждения молока при нарушении электроснабжения. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):83–93.

Original Empirical Research

Energy-Technological Criterion for Managing Milk Cooling Reserve During Power Supply Failures

Dmitry N. Savenkov¹ , Aleksey A. Sherbakov¹ , Alexander A. Mironenko¹ , Pavel S. Kobylatsky² 

¹Don State Technical University, Donetsk, Russian Federation

²Don State Agrarian University, Persianovsky settlement, Rostov region, Russian Federation

✉ savenkov-dstu@yandex.ru

Abstract

Introduction. The quality of dairy products is determined by the cumulative effect of energy parameters and temporal factors within the cooling process. Immediately after milking, prompt reduction of raw material temperature is required, followed by maintaining the specified thermal regime until the transportation or processing stage. Existing energy calculation methodologies applied to milk storage tanks fail to provide a comprehensive framework; it is essential to account for the passive thermal reserve, which is conditioned by the finite heat capacity of both the product and the containment structures, as well as the development kinetics of psychrotrophic microflora. Research indicates that the pre-cooling duration and the transition rate through the high-temperature zone critically influence product quality. Consequently, the evaluation criterion must be dynamic and based on sensor data. The objective of this study is to develop an energy-technological criterion that integrates thermal, microbiological, and electrical reserves to facilitate operational decision-making during power supply interruptions.

Materials and Methods. An energy-technological criterion has been proposed to evaluate the time reserve during power supply interruptions in a milk storage tank. The criterion incorporates three distinct components: a thermal reserve (conditioned by the thermal inertia of both the product heating and the containment structures); a microbiological reserve (determined by the dynamics of microflora growth, accounting for the initial bacterial load); and an electrical reserve (dependent on the capacity of the backup power source and the critical load level). The resulting composite indicator is compared with the forecasted power restoration time: if the forecasted duration exceeds the calculated reserve, emergency response actions are required. Model parameterization involves local identification of the tank's thermal characteristics and calibration of microbiological dependencies based on empirical data.

Research results. An analysis of the temperature margin's sensitivity to key parameters was conducted; the dominant influence of the initial and limiting temperatures was established, driven by the narrow process window. The feasibility of reducing requirements for the thermal storage unit by increasing the passive thermal margin was demonstrated. Taking measurement uncertainty into account, a safety margin based on statistical estimation has been proposed. A dimensionless criterion has been developed to rank process risk zones and formulate an algorithm for management decisions. Model verification involves phased experimental measurements of thermal, electrical, and microbiological parameters, followed by an assessment of predictive accuracy.

Discussion and conclusion. The criterion integrates energy and process parameters, providing a transparent assessment of the reserve capacity. Priority measures depend on the limiting factor — whether thermal, microbiological, or electrical. The metric serves as a predictive indicator between laboratory analyses and is applicable to the multi-criteria optimization of costs and risks. Increasing model complexity is justified only if it reduces errors on independent data; otherwise, a simple, conservative model is preferable.

Keywords: milk cooling, power supply interruption, thermal inertia, microbiological risk; thermal energy storage, time reserve, energy-technological criterion, agro-industrial complex

Funding. This work was carried out within the framework of State Assignment 075-03-2025-302/1 (FZNE-2025-0002).

For citation: Savenkov DN, Shcherbakov AA, Mironenko AA, Kobylatsky PS. Energy-technological criterion for managing milk cooling reserves during power supply interruptions. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):83–93.

Введение. Первичное охлаждение молока относится к процессам, в которых качество продукции зависит одновременно от энергетики и времени. После доения продукт необходимо быстро охладить, а затем удерживать в

установленном температурном диапазоне до вывоза или переработки. ISO 5708 задаёт требования к охлаждающим танкам, а ISO 23130 — к устройствам мониторинга и регистрации температуры в резервуарах. Технический регламент Таможенного союза 033/2013 устанавливает обязательные требования безопасности молока и молочной продукции. Однако ни номинальная мощность холодильного агрегата, ни ёмкость аккумулятора по отдельности не отвечают на диспетчерский вопрос: сколько времени остаётся до технологически значимого ухудшения состояния партии при текущих температуре продукта, температуре среды и ожидаемом времени восстановления электроснабжения.

Традиционный энергетический расчёт определяет автономию как отношение доступной энергии к мощности нагрузки. Для молочного танка этот подход неполон. После отключения компрессора температура не перескакивает к температуре воздуха, а растёт вследствие конечной теплоёмкости продукта и ограждений. Таким образом, существует пассивный тепловой резерв. С другой стороны, допустимость температуры не может оцениваться без длительности: психротрофная микрофлора способна развиваться и при холодильном хранении, а скорость роста зависит от температуры и исходной обсеменённости [1–5]. Технологический предел должен учитывать либо нормативную температуру, либо отношение текущей микробной численности к допускаемой.

Исследования охлаждения сырого молока показывают, что время до начала охлаждения и скорость прохождения высокотемпературной области существенно влияют на качество. Christiansson подчёркивал особую значимость ранней стадии охлаждения [2]. Работа Paludetti и соавторов по предварительному охлаждению демонстрирует одновременно энергетический и технологический эффект [3]. Исследования хранения при 2, 4 и 6 °C показывают, что низкая температура замедляет изменения, но не превращает хранение в неограниченный процесс [4, 5]. Следовательно, критерий должен быть динамическим и обновляться по данным датчиков.

В исходной концепции обозначение R_{milk} использовалось как коэффициент изменения микробиологического состояния молока. В настоящей переработке устранена неоднозначность: $R_{milk} = N/N_0$, где N — текущая численность выбранной индикаторной группы микроорганизмов, N_0 — начальная численность. Допустимое отношение $R_{milk} = N_{lim}/N_0$ зависит от измеренного N_0 и нормативного или технологического предела N_{lim} . Значение $R_{lim}=3$ допустимо только в частном случае, когда N_0 ровно вдвое меньше N_{lim} ; оно не является универсальной константой.

Цель работы — разработать воспроизводимый энерготехнологический критерий, который объединяет тепловой, микробиологический и электрический резервы и позволяет принимать решения при нарушении электроснабжения молочного хозяйства. Исследование является расчётно-теоретическим и параметрическим; оно не заявляет результаты не проведённых микробиологических опытов.

Материалы и методы

Структура критерия. Рассматривается охлаждаемый резервуар с массой молока M , начальной температурой T_0 , температурой окружающей среды T_a и предельной температурой T_{lim} . В нормальном режиме холодильная машина поддерживает заданную температуру. При нарушении питания компрессор останавливается либо получает питание от аккумуляторного накопителя. Доступный интервал складывается из электрической автономии τ_E и остаточного пассивного резерва после истощения батареи. Пассивный резерв ограничивается меньшим из двух времён: достижением температурного предела τ_T и достижением микробиологического предела τ_R .

Из суммарного интервала вычитается технологический запас τ_m , включающий обнаружение отказа, связь с персоналом, переключение схемы, неопределённость параметров и время безопасной остановки. Итоговый критерий имеет размерность времени и непосредственно сопоставим с прогнозом восстановления электроснабжения t_{rest} .

$$\tau^* = \tau_E + \min(\tau_T, \tau_R) - \tau_m \quad (1)$$

$$\chi = t_{rest}/\tau^* \quad (2)$$

При $\chi < 0,7$ система имеет рабочий запас; интервал $0,7 \leq \chi < 1$ рассматривается как предупреждающий; $\chi \geq 1$ означает, что ожидаемое восстановление выходит за предел текущего резерва. Граница 0,7 — управленческая уставка, а не норматив: хозяйство может выбрать более консервативное значение на основании неопределённости прогноза и стоимости партии. Если $\tau^* \leq 0$, аварийное действие требуется независимо от t_{rest} .

Алгоритм формирования и применения энерготехнологического критерия представлен на рис. 1. Обозначения и способы определения параметров — в таблице 1.

Алгоритм применения энерготехнологического критерия

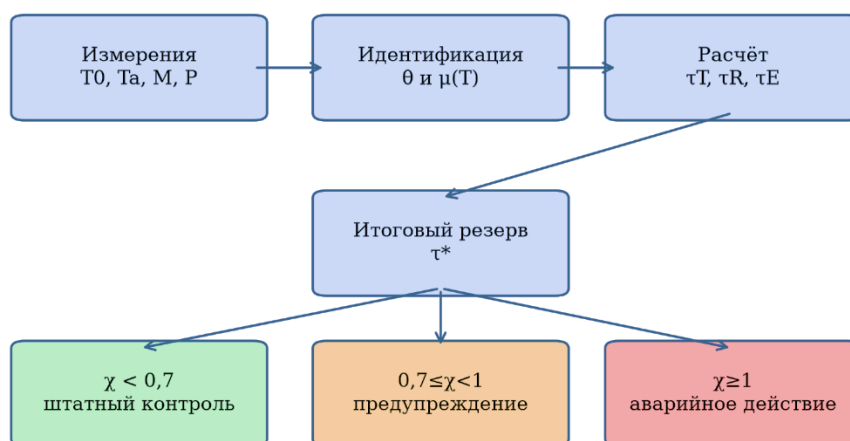


Рис. 1. Алгоритм формирования и применения энерготехнологического критерия

Таблица 1

Обозначения и способы определения параметров

Параметр	Смысл	Единица	Источник данных
T_0, T_a, T_{lim}	начальная, наружная и предельная температуры	°C	датчики и технологический регламент
θ	тепловая постоянная резервуара	мин	идентификация по кривой пассивного нагрева
N_0, N_{lim}	начальная и предельная численность	КОЕ/см ³	лабораторный анализ/норматив
$\mu(T)$	удельная скорость роста	мин ⁻¹	калиброванная микробиологическая модель
E_u	полезная энергия накопителя	кВт·ч	контрольный разряд и система BMS
P_c	критическая электрическая нагрузка охлаждения	кВт	измеритель мощности
t_{rest}	прогноз времени восстановления	мин	диспетчерская оценка/статистика сети
τ_m	резерв на действие и неопределённость	мин	политика управления риском

Тепловая модель. После прекращения активного охлаждения тепловой баланс в модели сосредоточенной теплоёмкости записывается как $C_\Sigma dT/dt = U_A(T_a - T)$, где C_Σ — эффективная теплоёмкость молока, стенок и внутренних конструкций, U_A — интегральная теплопередача от среды. При постоянной T_a решение является аperiodическим:

$$T(t) = T_a - (T_a - T_0)\exp(-t/\theta) \quad (3)$$

$$\theta = C_\Sigma / (U_A) \quad (4)$$

Если $T_a > T_{lim} > T_0$, время достижения предела определяется обращением формулы (3):

$$\tau_T = \theta \ln[(T_a - T_0)/(T_a - T_{lim})] \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что запас линейно растёт с θ , но нелинейно зависит от температур. При $T_a \leq T_{lim}$ предел не достигается в рамках модели и τ_T формально стремится к бесконечности; в алгоритме такое состояние ограничивается горизонтом прогноза. При изменяющейся T_a используется численное интегрирование дифференциального уравнения, а не подстановка средней температуры.

Для резервуара, в котором теплоёмкость молока доминирует, $C_\Sigma \approx M_{cm} + C_{wall}$. Если U_A меняется с уровнем заполнения, θ не обязательно пропорциональна массе. Поэтому параметр идентифицируют отдельно для характерных уровней 25, 50, 75 и 100 % заполнения. Эксперимент проводится без включения компрессора на коротком безопасном интервале; θ оценивается нелинейной регрессией по измеренной $T(t)$ и $T_a(t)$. Параметрические кривые нагрева при $T_a = 22$ °C и $T_{lim} = 6$ °C представлены на рис. 2.

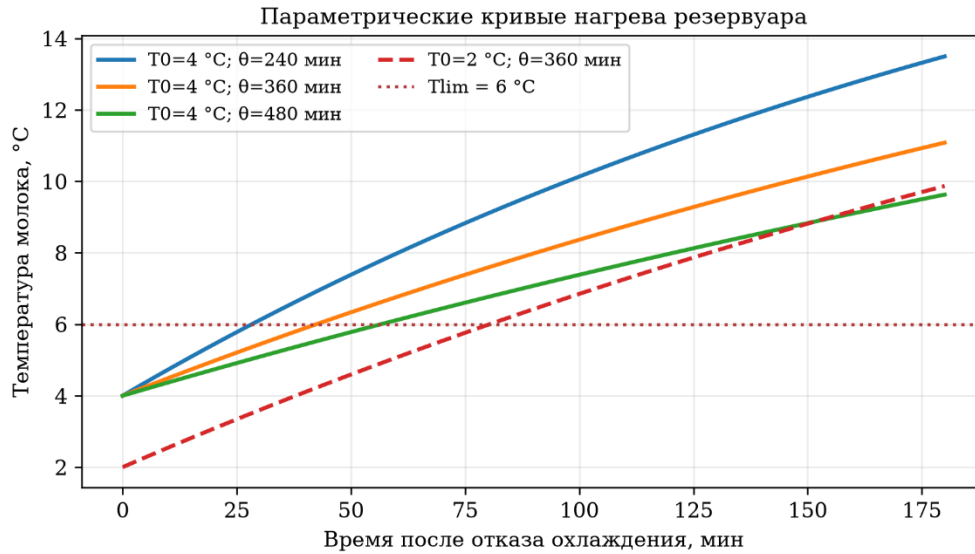


Рис. 2. Параметрические кривые нагрева при $T_a=22\text{ °C}$ и $T_{lim}=6\text{ °C}$

Микробиологическая составляющая R_{milk} . Для выбранной индикаторной группы микроорганизмов используется модель $dN/dt = \mu[T(t)]N$. Интегрирование даёт относительный критерий:

$$R_{milk}(t) = N(t)/N_0 = \exp(\int \mu[T(s)]ds) \quad (6)$$

$$R_{lim} = N_{lim}/N_0 \quad (7)$$

Микробиологический резерв τ_R — первый момент, когда $R_{milk}(t) = R_{lim}$. Если μ постоянна, $\tau_R = \ln(R_{lim})/\mu$; при меняющейся температуре интеграл вычисляется по траектории $T(t)$. Для вторичной температурной модели может применяться зависимость Ратковского $\sqrt{\mu} = b(T - T_{min})$ в допустимом диапазоне [1]. Однако параметры b и T_{min} специфичны для вида микроорганизмов, матрицы продукта и условий хранения; использование литературных коэффициентов без локальной калибровки допускается только для сценарной оценки.

Начальная обсеменённость влияет на результат не меньше температуры. При одном и том же N_{lim} партия с большим N_0 имеет меньший R_{lim} и быстрее достигает предела. Поэтому оперативный алгоритм должен получать N_0 из лабораторного контроля или использовать консервативный квантиль исторического распределения. Простое назначение $R_{milk} \leq 3$ без учёта N_0 способно как переоценить, так и недооценить допустимый интервал.

Модель экспоненциального роста описывает фазу без ограничения субстрата и не учитывает лаг-фазу. Для короткого аварийного интервала это может быть консервативно или неконсервативно в зависимости от адаптации психротрофной микрофлоры. Программа верификации должна сравнивать модели без лаг-фазы и с лаг-фазой, а выбор выполнять по независимой выборке и информационному критерию.

Энергетическая составляющая. Электрический резерв определяется полезной энергией накопителя E_u и критической мощностью P_c . Если мощность постоянна, $\tau E = 60 E_u / P_c$. Для переменного графика работающего компрессора, насосов и автоматики используется интегральное условие $\int P(t)dt = E_u$. Полезная энергия должна быть получена контрольным разрядом при проектной температуре и конечном напряжении; номинальная энергия батареи без коэффициентов КПД, глубины разряда и старения завышает резерв.

$$\tau E = 60 E_u / P_c \quad (8)$$

Если прогноз восстановления электроснабжения t_{rest} известен, минимальная полезная энергия батареи выводится из условия $t_{rest} + \tau_m \leq \tau_E + \min(\tau_T, \tau_R)$:

$$E_{\min} = P_c \cdot \max[0, t_{rest} + \tau_m - \min(\tau_T, \tau_R)] / 60 \quad (9)$$

$$E_{nom, \min} = E_{\min} / (\eta \cdot DOD \cdot k_T \cdot k_{SOH}) \quad (10)$$

Здесь k_{SOH} учитывает остаточное состояние батареи. Формула (9) показывает эффект технологической инерции: батарея покрывает не всё время восстановления, а только часть, не перекрытую безопасным пассивным резервом. Вместе с тем аккумулятор нельзя уменьшать до нуля только потому, что τ_T велик: питание требуется автоматике, клапанам, связи и средствам контроля. Поэтому P_c должна включать критическую, а не только компрессорную нагрузку, а минимальный резерв для управления задаётся отдельно.

Параметрический численный эксперимент

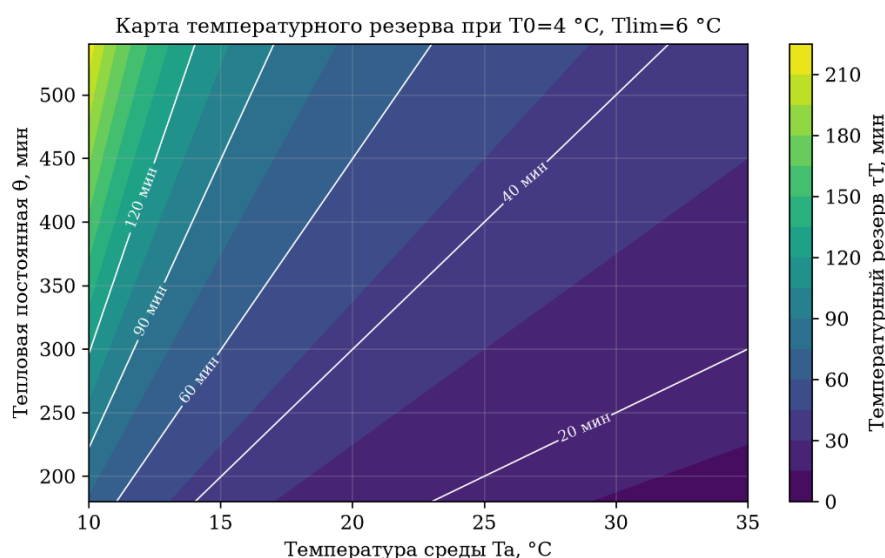
План и воспроизводимость расчёта. Численный эксперимент проведён в диапазоне $T_a=10\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\theta=180\text{--}540$ мин при $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рассматривались $T_0=2$ и $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для каждого узла сетки вычисляли τ_T по формуле (5), затем определяли чувствительности и минимальную энергию батареи. Такой план охватывает прохладную и жаркую погоду, а также резервуары с различной теплоизоляцией и наполнением. Расчёт детерминирован; искусственная случайная выборка и неподтверждённые результаты Монте-Карло не использовались. Факторы параметрического эксперимента представлены в таблице 2.

Базовый сценарий: $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta=360$ мин, $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_c=7,5$ кВт, $\eta=0,88$, $\tau_m=15$ мин. Микробиологический резерв в численном примере не задавался произвольно; предполагается, что $\tau_R \geq \tau_T$, поэтому ограничивающим является температурный предел. Если лабораторная калибровка даст $\tau_R < \tau_T$, в формулах используется τ_R .

Таблица 2

Факторы параметрического эксперимента

Фактор	Уровни/диапазон	Причина включения
T_a	10–35 $^{\circ}\text{C}$	сезонное изменение теплопритока
T_0	2 и 4 $^{\circ}\text{C}$	сравнение предварительного переохлаждения
T_{lim}	6 $^{\circ}\text{C}$	иллюстративная технологическая граница
θ	180–540 мин	различная теплоизоляция и масса продукта
P_c	7,5 кВт в базовом примере	критическая мощность охлаждения
τ_m	15 мин	резерв на действие и неопределённость

Рис. 3. Карта температурного резерва в диапазоне T_a и θ при $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Расчётные результаты. При $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$ логарифмический множитель для $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $\ln(18/16)=0,1173$. Для $\theta=240, 360$ и 480 мин температурный резерв составляет 28,3; 42,4 и 56,5 мин. При $T_0=2\text{ }^{\circ}\text{C}$ множитель $\ln(20/16)=0,2231$, а резерв — 53,6; 80,3 и 107,1 мин. Снижение начальной температуры на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ даёт прирост 25,3; 37,9 и 50,6 мин. Относительный прирост одинаков — 89,5 %, поскольку оба времени линейно масштабируются с θ .

Результат не означает, что предварительное переохлаждение всегда энергетически выгодно. Для достижения $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ компрессор потребляет дополнительную энергию, а слишком низкая температура может быть нежелательна по технологическим причинам. Критерий позволяет поставить оптимизационную задачу: сравнить стоимость дополнительного охлаждения в штатном режиме со снижением требуемой батарейной энергии и риска потери партии.

Карта на рис. 3 показывает резкое уменьшение τ_T при повышении T_a . Это следует из сближения T_a с высокотемпературной областью и увеличения движущей силы теплопередачи. При больших θ изолинии сдвигаются к большему резерву почти пропорционально. Следовательно, улучшение теплоизоляции и увеличение эффективно охлаждённой массы могут быть альтернативой чисто электрическому увеличению накопителя.

Таблица 3

Температурный резерв при $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$

θ , мин	τ_T при $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, мин	τ_T при $T_0=2\text{ }^{\circ}\text{C}$, мин	Прирост, мин	Прирост, %
240	28,3	53,6	25,3	89,5
360	42,4	80,3	37,9	89,5
480	56,5	107,1	50,6	89,5

Анализ чувствительности. Локальные производные формулы (5) позволяют оценить, какие измерения сильнее влияют на τ_T :

$$\partial\tau_T/\partial\theta = \ln[(T_a-T_0)/(T_a-T_{lim})] \quad (11)$$

$$\partial\tau_T/\partial T_0 = -\theta/(T_a-T_0) \quad (12)$$

$$\partial\tau_T/\partial T_a = \theta[1/(T_a-T_0) - 1/(T_a-T_{lim})] \quad (13)$$

$$\partial\tau_T/\partial T_{lim} = \theta/(T_a-T_{lim}) \quad (14)$$

В базовой точке $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta=360$ мин производные равны: $\partial\tau_T/\partial\theta=0,1173$ мин/мин; $\partial\tau_T/\partial T_0=-20,0$ мин/ $^{\circ}\text{C}$; $\partial\tau_T/\partial T_a=-2,50$ мин/ $^{\circ}\text{C}$; $\partial\tau_T/\partial T_{lim}=22,5$ мин/ $^{\circ}\text{C}$. Большая чувствительность к T_0 и T_{lim} объясняется узким интервалом между исходной и предельной температурами. Ошибка датчика $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ может дать несколько минут неопределённости, поэтому датчики должны быть откалиброваны в рабочем диапазоне $2-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

Знак $\partial\tau_T/\partial T_0$ отрицателен: более тёплое начальное молоко уменьшает запас. Знак $\partial\tau_T/\partial T_a$ также отрицателен: жаркая среда ускоряет достижение предела. Повышение θ и T_{lim} увеличивает расчётное время, но T_{lim} нельзя выбирать из энергетических соображений – он задаётся требованиями качества и безопасности.

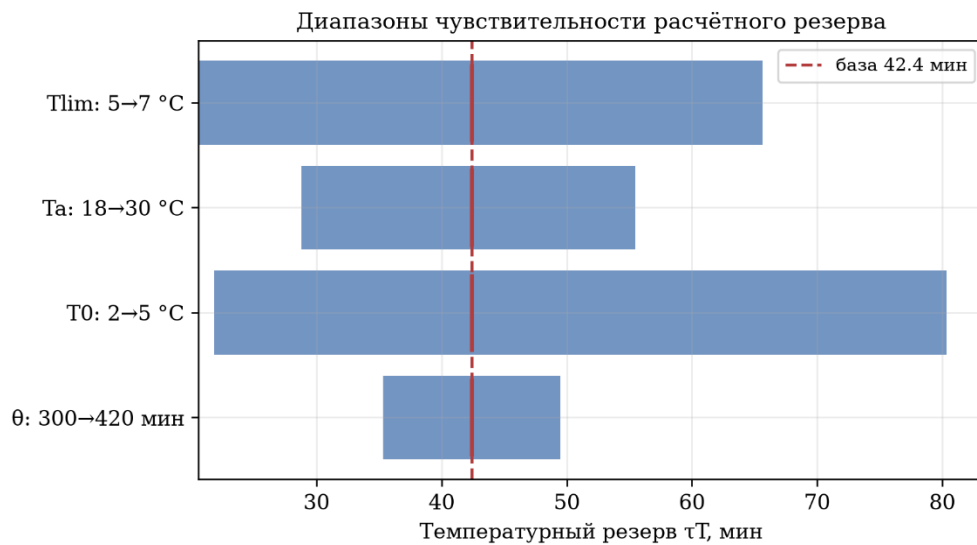


Рис. 4. Диапазоны чувствительности τ_T к тепловой постоянной и температурам

Согласование с аккумуляторным накопителем. Для $P_c=7,5$ кВт и $\eta=0,88$ каждый 1 кВт·ч номинальной энергии, доступный с учётом остальных коэффициентов, добавляет $60 \cdot 0,88/7,5=7,04$ мин активного охлаждения. Наоборот, 10 кВт·ч полезной энергии обеспечивают 80 мин работы нагрузки 7,5 кВт до учёта ограничений мощности и пусковых токов. Если $t_{rest}=120$ мин, $\tau_m=15$ мин и пассивный резерв равен 60 мин, формула (9) даёт $E_{w,min}=7,5 \cdot 75/60=9,375$ кВт·ч.

При $\eta \cdot DOD \cdot k_T \cdot k_{SOH}=0,88 \cdot 0,8 \cdot 0,85=0,4787$ требуемая номинальная энергия возрастает до 19,6 кВт·ч.

Рис. 5 показывает, что при коротком времени восстановления батарея может не требоваться для компрессора, если пассивного резерва достаточно, однако остаётся необходимость питать автоматику и связь. После пересечения линии $t_{rest}+\tau_m=\tau_{pass}$ требуемая энергия растёт линейно. Увеличение пассивного резерва с 30 до 90 мин сдвигает начало роста на один час и может существенно снизить капиталоемкость накопителя.

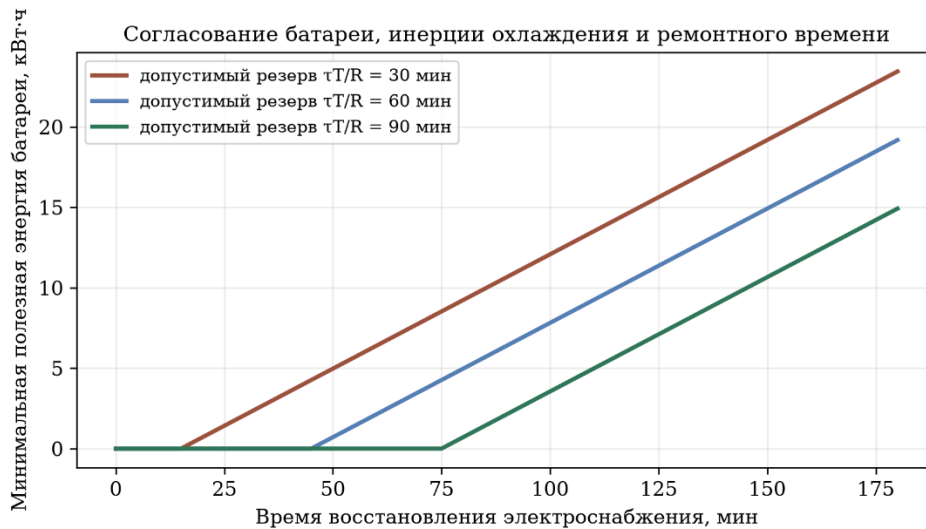


Рис. 5. Минимальная полезная энергия батареи для нагрузки 7,5 кВт при различных пассивных резервах

Таблица 4

Пример подбора накопителя при $P_c=7,5$ кВт, $\tau_m=15$ мин

t_{rest} , мин	τ_{pass} , мин	$E_{u,min}$, кВт·ч	$E_{nom,min}$ при коэффициенте 0,4787, кВт·ч
60	60	1,875	3,92
90	60	5,625	11,75
120	60	9,375	19,58
180	60	16,875	35,25
120	90	5,625	11,75

Неопределённость и безопасный резерв. Для независимых входных параметров стандартную неопределённость τ_T можно приближённо оценить по закону распространения:

$$u^2(\tau_T) = \sum (\partial \tau_T / \partial x_i)^2 u^2(x_i) \quad (15)$$

Пусть $u(\theta)=20$ мин, $u(T_0)=u(T_a)=u(T_{lim})=0,2$ °С. В базовой точке вклады составят 2,35; 4,00; 0,50 и 4,50 мин соответственно, а суммарная стандартная неопределённость $u(\tau_T)=6,52$ мин. Односторонний безопасный резерв при коэффициенте $k=1,645$ равен $\tau_{safe}=42,4-1,645 \cdot 6,52=31,7$ мин. Пример показывает, что управленческий запас 15 мин сопоставим с измерительной неопределённостью и должен уточняться по фактическим характеристикам датчиков и модели.

Для зависимых параметров и нелинейной области около $T_a=T_{lim}$ линейное распространение недостаточно. Тогда применяют бутстрэп по остаткам идентификации θ или вероятностное моделирование с документированными распределениями. Настоящая работа намеренно не приводит численных вероятностей потери партии без исходного массива наблюдений.

$$\tau_{safe} = \tau - k \cdot u(\tau^*) \quad (16)$$

Интерпретация критерия в системе управления. Отношение $\chi = t_{rest}/\tau^*$ превращает неоднородные параметры в единую безразмерную шкалу. При $\chi < 0,7$ оператор продолжает штатный контроль; при $0,7 \leq \chi < 1$ система выдаёт предупреждение и готовит действия; при $\chi \geq 1$ требуется аварийная стратегия. Ею может быть запуск генератора, подключение мобильного накопителя, снижение теплопритока, запрет поступления новой тёплой порции молока либо досрочный вывоз партии. Выбор действия зависит от хозяйства, но триггер формируется одинаково.

Индекс следует обновлять при каждом новом измерении. Если температура среды растёт, θ переоценивается или диспетчер увеличивает t_{rest} , χ повышается. После запуска генератора или уменьшения мощности некритической нагрузки τ_E возрастает, и χ снижается. Таким образом, критерий описывает состояние, а не неизменную характеристику установки.

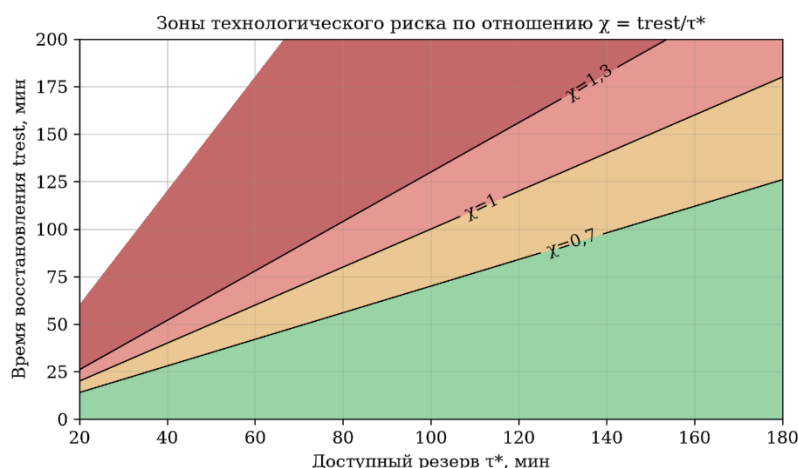


Рис. 6. Зоны технологического риска по отношению времени восстановления к доступному резерву

Программа экспериментальной верификации. Для превращения критерия в измерительную методику требуется серия безопасных опытов на конкретном молочном танке. На первом этапе определяют θ при разных уровнях заполнения и температурах среды. Датчики устанавливают минимум в трёх точках продукта, на стенке и в воздухе; перемешивание задают одинаково. После стабилизации T_0 охлаждение отключают на интервал, не доводящий продукт до недопустимого состояния, затем аппроксимируют формулу (3) и анализируют остатки.

На втором этапе измеряют электрическую мощность компрессора, насосов, мешалки и автоматики во всех режимах. Пусковые события проверяют отдельно по мощности инвертора, а полезную энергию батареи – контрольным разрядом при проектной температуре. На третьем этапе калибруют $\mu(T)$ для выбранных индикаторных микроорганизмов по утверждённой лабораторной программе, включая исходную обсеменённость, лаг-фазу и воспроизводимость анализа.

На четвёртом этапе проводят слепую проверку: по первым измерениям прогнозируют τ_T и τ_R , затем сравнивают с фактическим достижением контрольной температуры и микробиологическим результатом. Показателями качества модели являются средняя абсолютная ошибка времени, покрытие доверительного интервала и доля опасных недооценок. Ввод критерия в эксплуатацию допустим только после определения безопасной односторонней погрешности.

Таблица 5

План верификации модели

Этап	Измерения	Результат	Критерий качества
Тепловой	$T(t)$, $T_a(t)$, уровень, перемешивание	θ и модель остатка	ошибка прогноза τ_T
Энергетический	$P(t)$, E_{in} , температура батареи	τ_E и $E_{nom,min}$	ошибка энергетического баланса
Микробиологический	N_0 , $N(t)$, $T(t)$	$\mu(T)$, R_{lim} , τ_R	ошибка и опасная недооценка
Интегральный	t_{rest} и все резервы	χ и действие	отсутствие выхода за предел без тревоги

Обсуждение и заключение. Предлагаемый критерий развивает энергетический подход за счёт включения технологической инерции. Его преимущество – прозрачность: каждое слагаемое имеет физический смысл и способ измерения. Если ограничивающим оказывается τ_T , эффективны теплоизоляция, предварительное охлаждение и управление поступлением тёплого молока. Если τ_R , приоритетом становятся санитарное состояние и исходная обсеменённость. Если τ_E , требуется увеличение полезной энергии, снижение критической мощности или генератор.

На практике R_{milk} не должен подменять лабораторный контроль. Это прогнозный индикатор, который обновляет риск между анализами. Даже при низкой температуре качество зависит от исходной микрофлоры, ферментов психротрофов и длительности хранения [7, 8]. Поэтому предельное значение N_{lim} выбирают для конкретного показателя и маршрута переработки, а не переносят из чужой модели.

Снижение T_0 с 4 до 2 °C почти удваивает τ_T в рассматриваемом примере, но требует дополнительной холодильной энергии. Оптимум зависит от тарифа, вероятности отказов и стоимости потери партии. Критерий пригоден для многокритериальной оптимизации, где целевая функция включает стоимость электроэнергии, деградацию батареи, запуск генератора и ожидаемый технологический ущерб.

Модель первого порядка хорошо интерпретируема, но реальный резервуар может иметь стратификацию, периодическое перемешивание, изменение T_a и приток новой порции. Для таких условий применяют многозональную модель или серый ящик, сохраняя физические ограничения. Сложность модели оправдана только если она уменьшает опасную ошибку на независимых данных; иначе предпочтительнее консервативная простая модель с большим τ_m . Разработан критерий $\tau^* = \tau_E + \min(\tau_T, \tau_R) - \tau_m$, объединяющий электрическую автономию, тепловую инерцию и микробиологический резерв молока. Безразмерное отношение $\chi = \text{trest} / \tau^*$ формирует штатную, предупреждающую и аварийную зоны управления.

Для аperiodической модели нагрева получена формула $\tau_T = \theta \ln[(T_a - T_0)/(T_a - T_{lim})]$. При $T_a = 22^\circ\text{C}$ и $T_{lim} = 6^\circ\text{C}$ снижение T_0 с 4 до 2 $^\circ\text{C}$ увеличивает резерв на 25,3–50,6 мин при $\theta = 240$ –480 мин, или на 89,5 %. Минимальная полезная энергия накопителя определяется как $E_{u,\min} = P_c \cdot \max[0, \text{trest} + \tau_m - \min(\tau_T, \tau_R)] / 60$. Формула показывает взаимозаменяемость части электрического и пассивного технологического резерва, но не отменяет питание автоматики и проверку пусковой мощности.

В базовой точке высокая чувствительность τ_T к T_0 и T_{lim} требует калиброванных датчиков и одностороннего запаса неопределённости. Числовые вероятности риска допустимы только после идентификации параметров по экспериментальным данным. Предложена программа верификации, включающая идентификацию θ для уровней заполнения, измерение полезной энергии и нагрузки, калибровку $\mu(T)$ и слепую проверку времени достижения пределов.

Список литературы/References

1. Ratkowsky DA, Olley J, McMeekin TA, Ball A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *Journal of Bacteriology*. 1982;149(1):1–5. <https://doi.org/10.1128/jb.149.1.1-5.1982>
2. Christiansson AA. Predictive model to evaluate the impact of the cooling profile on growth of psychrotrophic bacteria in raw milk from conventional and robotic milking. *Journal of Dairy Research*. 2017;84(3):318–321. <https://doi.org/10.1017/S0022029917000334>
3. Paludetti LF, Kelly AL, O'Brien B, Jordan K, Gleeson D. The effect of different precooling rates and cold storage on milk microbiological quality and composition. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(3):1921–1929. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13668>
4. O'Connell A. et al. The effect of storage conditions on the composition and functional properties of blended bulk tank milk. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:991–1003. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11314>
5. Zhuang J. et al. Relationship between microorganisms and milk metabolites during quality changes in refrigerated raw milk: A metagenomic and metabolomic exploration. *International Journal of Food Microbiology*. 2024;425:110891. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110891>
6. Andrus AD et al. Postpasteurization hold temperatures of 4 or 6 $^\circ\text{C}$ affect bacterial outgrowth in pasteurized fluid milk. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(11):7640–7643. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9531>
7. McMeekin TA et al. *Predictive Microbiology: Theory and Application*. Taunton: Research Studies Press, 1993.
8. Baranyi J, Roberts TA. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *International Journal of Food Microbiology*. 1994;23:277–294. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(94\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)90157-0)
9. Zwietering MH. et al. Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*. 1990;56(6):1875–1881. <https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>
10. Koutsoumanis KP, Lianou A. Stochasticity in colonial growth dynamics of individual bacterial cells. *Applied and Environmental Microbiology*. 2013;79:2294–2301. <https://doi.org/10.1128/AEM.03629-12>
11. James C, Onarinde BA, James SJ. The use and performance of household refrigerators: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017;16:160–179. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12242>
12. ASHRAE. Handbook – Refrigeration. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.
13. Incropera FP. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2017.
14. Doerffel D, Sharkh SA. A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of batteries. *Journal of Power Sources*. 2006;155:395–400. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.030>
15. O'Connor PDT, Kleyner A. *Practical Reliability Engineering*. 5th ed. Chichester: Wiley, 2012.
16. Meeker WQ, Escobar LA, Pascual FG. *Statistical Methods for Reliability Data*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2022.

Об авторах:

Савенков Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры техники и технологий пищевых производств, руководитель НИЛ "PCM-STAR" Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), savenkov-dstu@yandex.ru

Щербakov Алексей Александрович, научный сотрудник НИЛ "PCM-STAR", ведущий инженер ИЦ Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](#), alexey_shcherbakov97@mail.ru

Мироненко Александр Андреевич, инженер НИЛ "PCM-STAR", магистрант Передовой Инженерной Школы Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) aleksandr.mironenko2012@yandex.ru

Кобыляцкий Павел Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры пищевых технологий Донского государственного аграрного университета (346493, Российская Федерация, Ростовская обл., п. Персиановский, ул. Кривошлыкова, 24) [ORCID](#), dongau@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Д.Н. Савенков: разработка концепции и общей структуры критериев, постановка задачи, формулировка основных соотношений, общее руководство исследованием, финальное редактирование текста.

А.А. Щербakov: проведение параметрического численного эксперимента, анализ чувствительности, расчёт производных, подготовка таблиц и рисунков.

А.А. Мироненко: обзор литературы, сбор и систематизация исходных данных, формулировка программы экспериментальной верификации, подготовка иллюстративного материала, оформление рукописи, участие в интерпретации полученных результатов.

П.С. Кобыляцкий: сбор, структурирование и анализ первичных данных; разработка программы экспериментальной апробации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry N. Savenkov, Cand. Sci (Eng), Associate Professor at the Department of Food Production Machinery and Technologies, Head of the "RSM-STAR" Research Laboratory at Don State Technical University State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ORCID](#), savenkov-dstu@yandex.ru

Aleksey A. Sherbakov, Research Fellow at the RSM-STAR Research Laboratory and Lead Engineer at the Engineering Center of Don State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ORCID](#), alexey_shcherbakov97@mail.ru

Alexander A. Mironenko, Engineer at the RSM-STAR Research and Development Laboratory, Master's student at the Advanced Engineering School of Don State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) aleksandr.mironenko2012@yandex.ru

Pavel S. Kobilyatsky, Cand. Sci (Agricultural), Associate Professor of the Department of Food Technologies, Don State Agrarian University (24, Krivoshlykova St., Persianovsky Settlement, Rostov Region, 346493, Russian Federation) [ORCID](#), dongau@mail.ru

Claimed contributorship:

DN Savenkov: development of the concept and general structure of criteria, problem definition, formulation of key relationships, general supervision of the research, final editing of the text.

AA Sherbakov: conducting a parametric numerical experiment, sensitivity analysis, calculating derivatives, preparing tables and figures.

AA Mironenko: literature review, collection and systematization of initial data, formulation of the experimental verification program, preparation of illustrative material, manuscript formatting, participation in the interpretation of the obtained results.

PS Kobilyatsky: collection, structuring, and analysis of primary data; development of an experimental approbation program.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 07.07.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 21.07.2026

Принята к публикации/Accepted 01.08.2026